

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»
УДК 621.396.2

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л. Д. Писаренко

«__» _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності – 171 Електроніка

**на тему: «Системи моніторингу земної поверхні для наземних
безпілотних транспортних засобів»**

Виконав:

Студент II курсу, групи ДЕ-81мп

Курпас Денис Валерійович _____

Науковий керівник:

ст. викл. Бевза О.М. _____

Рецензент: _____

Нормоконтроль:

Доцент, к.т.н. Чадюк В.О. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки**

Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою (спеціалізацією) – Електронні прилади та пристрої
Спеціальність – 171 Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Л.Д. Писаренко

«___» _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Курпасу Денису Валерійовичу**

1. Тема дисертації: «Системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів», науковий керівник дисертації Бевза Олег Миколайович, старший викладач, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. № 3859-с

2. Строк подання студентом дисертації: 10 грудня 2019

3. Об'єкт дослідження: лазерні випромінювання, зондування об'єктів, прийом та обробка відбитих лазерних випромінювань, контрасти яскравості, збереження виміряних даних, селектування даних.

4. Вихідні дані: напруга живлення: 12В, довжина хвилі лазерних діодів інфрачервоного діапазону: 905нм, довжина хвилі лазерних діодів видимого діапазону: 650нм, довжина хвилі лазерних діодів ультрафіолетового діапазону: 370нм, максимальна дальність сканування: більше 150м, точність сканування: менше 3 см, кутова роздільна здатність вертикальна: менше 0,05°, кутова роздільна здатність горизонтальна: менше 0,2°, горизонтальне поле зору: 360°, вертикальне поле зору: більше 35°, кількість точок даних за секунду: більше 500000, кількість каналів (променів): більше 40.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- Аналіз сучасних аналогів систем моніторингу земної поверхні з визначення їх основних аспектів та недоліків. Порівняти сучасні аналоги за основними характеристиками і параметрами з метою визначення оптимальної системи сканування поверхні з рішенням основних проблем при їх експлуатації.

- Розробка основного блоку системи сканування, що забезпечить якісне сканування об'єктів лазерним випромінюванням на відстані понад 150м. Удосконалення системи розгортки для сканування земної поверхні заради збільшення відстані сканування, покращення кутової роздільної здатності та точності.

- Модернізація системи сканування земної поверхні для наземного безпілотного апарату шляхом застосування додаткового блоку, що мають деякі відмінності, що полягають в застосуванні пристроїв та методик, що використовують інші спектральних діапазони лазерного випромінювання. Розробити систему для визначення типів покриттів за матеріалами з їх розподілом по ступеням загрози для НБТ, з подальшим проведенням заходів щодо його безпечної експлуатації як в пересіченій місцевості так і громадських місцях.
- Проаналізувати основні конструктивні та технічні аспекти системи, за результатами яких побудувати 3D модель системи моніторингу земної поверхні з компактним та безпечним розміщенням елементів.
- Розробити електричну структурну та принципову схеми системи моніторингу земної поверхні та його компонентів.
- Провести маркетинговий аналіз ринку систем сканування з метою встановлення вартості та стратегії реалізації продажу.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Схема електрична структурна системи моніторингу земної поверхні, схема електрична принципова систем формування оптичних сигналів, схема електрична принципова підсистеми детектування, блок-схема алгоритму роботи системи моніторингу земної поверхні.

Всього рисунків в дипломі: 55. Всього таблиць в дипломі: 26.

7. Орієнтовний перелік публікацій

Системи діагностики земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів / Курпас Д.В., Тищенко О.В., Бевза О.М. : Матеріали 13-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки» 4 квітня 2019 р./ кафедра Електронних приладів та пристроїв / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, ст. 132-140 [28].

9. Дата видачі завдання 3 березня 2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по системам діагностики земної поверхні для наземних безпілотних апаратів.	08.03.19	
2	Розробка схеми електричної структурної	01.04.19	
3	Розробка схеми електричної принципової	12.09.19	
4	Дослідження основних характеристик апарату	07.10.19	
5	Розрахунок основних параметрів та характеристик	01.11.19	
6	Розробка конструкторсько-технологічної частини	15.11.19	
7	Розробка стартап-проекту	01.12.19	
8	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та графіками, підготовка доповіді	16.12.19	

Студент

Д.В. Курпас

Науковий керівник дисертації

О.М. Бевза

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка	
1	A4				Завдання на дипломну роботу	3		
2	A4	МРП.171.081.006 ПЗ			Пояснювальна записка	115		
3	A1	МРП.171.081.006 Е1			Схема електрична структурна системи моніторингу земної поверхні.	1		
4	A2	МРП.171.081.006.001 Е3			Схема електрична принципова системи формування оптичних сигналів	1		
5	A2	МРП.171.081.006.002 Е3			Схема електрична принципова системи детектування.	1		
6	A1	МРП.171.081.006 СА			Блок-схема алгоритму роботи системи моніторингу земної поверхні	1		
7	A4	МРП.171.081.006.001 ПЕ			Перелік елементів системи формування оптичних сигналів	1		
8	A4	МРП.171.081.006.002 ПЕ			Перелік елементів системи детектування	1		
					МРП.171.081.006 ВМД			
		П.І.Б.	Підп.	Дата				
Розробник	Курпас Д.В.				Системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів.	Літ	Лист	Листів
Керівник	Бевза О.М.						1	1
Консультант						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ДЕ-81мп		
Н/контроль	Чадюк В.О.							
Зав. кафедри.	Писаренко Л.Д							

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

На тему: Системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів

РЕФЕРАТ

Системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів / Магістерська дисертація освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» напряму підготовки: 171 Електроніка (Електронні прилади та пристрої) **Курпас Денис Валерійович**. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-81мп. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

Ключові слова: Інфрачервоне випромінювання, ультрафіолетове випромінювання, видиме випромінювання, лазерний діод, лавинний фотодіод, підсистема розгортки, суперскалярний процесор, аналого-цифровий перетворювач, коефіцієнт відбиття, контраст яскравості, лідар, оптичний фільтр.

Короткий зміст роботи: В магістерській дисертації представлений огляд науково-технічної літератури по системам моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів.

Показаний аналіз сучасних аналогів систем моніторингу земної поверхні на основі лідару. Перспективи використання таких систем для безпілотних апаратів. Визначено основні аспекти систем моніторингу та основні проблеми при їх експлуатації. Представлена модернізована система моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів з: покращеними параметрами якості сканування та відображення об'єктів, з можливістю ідентифікації об'єктів за матеріалами. Було розроблено концепцію стартап-проекту, що дало змогу визначити вартість системи та маркетингову стратегію просування системи як товар на ринку.

Було розроблено електричну схему структурну системи моніторингу земної поверхні, електричні схеми принципів основних компонентів системи та розраховані основні параметри перетворювача постійної напруги, підсилювача лавинного фотодіода та драйвера лазерного діода. Приведена конструкторська документація на систему моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів, які можуть забезпечити наступні параметри:

- Кількість каналів (променів): 48 ;
- Напруга живлення 5-12 В;
- Максимальна відстань сканування: 160 м;
- Точність сканування: ± 2 см;
- Кутова роздільна здатність вертикальна: 0.04° ;
- Кутова роздільна здатність горизонтальна: 0.1° ;
- Швидкість обертання головки: 5-20 Гц;
- Горизонтальне поле зору: 360° ;
- Вертикальне поле зору: 40° ;
- Кількість точок даних за секунду: ~ 800000 ;

А Н О Т А Ц І Я

В магістерській дисертації представлений огляд науково-технічної літератури по системам моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів. Показаний аналіз сучасних аналогів систем моніторингу земної поверхні на основі лідару.

Визначено основні аспекти систем моніторингу та основні проблеми при їх експлуатації. Представлена модернізована система моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів з: покращеними параметрами якості сканування та відображення об'єктів, з можливістю ідентифікації поверхні за матеріалами. Було розроблено концепцію стартап-проекту, що дало змогу визначити вартість системи та маркетингову стратегію просування системи як товар на ринку.

Було розроблено електричну схему структурну системи моніторингу земної поверхні, електричні схеми принципові основних компонентів системи та розраховані основні параметри перетворювача постійної напруги, підсилювача лавинного фотодіода та драйвера лазерного діода. Приведена конструкторська документація на системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів, які можуть забезпечити наступні параметри:

- | | |
|---|-------------|
| - Кількість каналів (променів): | 48 ; |
| - Напруга живлення | 5-12 В; |
| - Максимальна відстань сканування: | 160 м; |
| - Точність сканування: | ± 2 см; |
| - Кутова роздільна здатність вертикальна: | 0.04°; |
| - Кутова роздільна здатність горизонтальна: | 0.1°; |
| - Швидкість обертання головки: | 5-20 ГЦ; |
| - Горизонтальне поле зору: | 360°; |
| - Вертикальне поле зору: | 40°; |
| - Кількість точок даних за секунду: | ~800000; |

Обсяг пояснювальної записки – 115 сторінок формату А4, 55 рисунків, 26 таблиць, 3 ілюстративних матеріалів (креслення) форматів А1 та 2 матеріали формату А2.

S U M M A R Y

The master's dissertation presents an overview of the scientific and technical literature on systems for monitoring the Earth's surface for land unmanned aerial vehicles. An analysis of modern analogues of the Lidar-based Earth surface monitoring systems is shown.

The basic aspects of monitoring systems and the main problems in their operation are identified. An upgraded ground-based monitoring system for land-based drones is introduced with: improved scanning and display quality of objects, with the ability to identify objects by material. The concept of a startup project was developed to determine the cost of the system and the marketing strategy for promoting the system as a product on the market.

An electrical circuit was developed for the structural monitoring system of the earth's surface, electrical circuits are the principal basic components of the system, and the basic parameters of a constant voltage converter, an avalanche photodiode amplifier and a laser diode driver were calculated. Design documentation for ground-based monitoring systems for land-based unmanned aerial vehicles is provided, which can provide the following parameters:

- Number of channels (rays): 48;
- Supply voltage 5-12 V;
- Maximum scanning distance: 160 m;
- Scanning accuracy: ± 2 cm;
- Vertical angular resolution: 0.04° ;
- Angular resolution horizontal: 0.1° ;
- Head rotation speed: 5-20 Hz;
- Horizontal field of view: 360° ;
- Vertical field of view: 40° ;
- Number of data points per second: ~ 800000 ;

Explanatory note volume - 115 A4 pages, 55 drawings, 26 tables, 3 illustrative A1 (drawings) and 2 A2 drawings.

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1. ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1. СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ НАЗЕМНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ ЛІДАРУ	10
1.1.1. Атрибути точок лідару	11
1.1.2. Типи наземних лідарів	13
1.1.3. Компоненти системи лідар.....	15
1.1.4. Система вимірювання відстані.....	16
1.1.5. Методи вимірювання відстані	17
1.1.6. Система розгортки для сканування.....	17
1.1.7. Система позиціонування і орієнтації	19
1.1.8. Сховище даних LAS	20
1.2. Порівняння сучасних лідарних систем	22
1.2.1. Лідар HDL-32E	22
1.2.2. Лідар HDL-64E.....	24
1.2.3. Лідар RS-LiDAR-32.....	26
1.2.4. Лідар TRIMBLE MX2	28
1.2.5. Основні переваги та недоліки лідарів.....	32
Висновки	34
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ ВІД ДОВЖИНИ ХВИЛІ ЛАЗЕРА	35
Висновки	40
3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ.....	41
3.1. Розробка структурної схеми системи моніторингу.....	41
3.1.1. Основний блок системи сканування поверхні	42
3.1.2. Додатковий блок системи сканування поверхні	43
3.2. Порівняння основних типів лазерів	44
3.2.1. Лазерні діоди для ІЧ-діапазону.....	49
3.2.2. Лазерні діоди для видимого діапазону	50

					МРП.171.081.006.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Курпас Д.В.				Системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів.	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Бевза О.М.						6	2
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ДЕ-81(мп)		
Н. Контр.	Чадюк В.О.							
Затверд.	Писаренко Л.Д.							

3.2.3. Лазерні діоди для УФ-діапазону.....	50
3.3. Фотоприймач лазерного випромінювання	51
3.3.1. Лавинні фотодіоди для видимого та ІЧ-діапазону	53
3.3.2. Лавинні фотодіоди для УФ-діапазону.....	53
3.4. Драйвери лазерних діодів	54
3.5. Драйвери лавинних фотодіодів	54
3.6. Аналого-цифровий перетворювач.....	54
3.7. Оптичні фільтри.....	58
3.8. Оптичні лінзи передавальної і приймальної підсистеми.....	60
3.9. Цифровий сигнальний процесор.....	61
3.10. Одноплатний комп'ютер на основі суперскалярного процесора	65
3.11. Алгоритм роботи системи моніторингу земної поверхні	66
3.12. Методика визначення типу поверхні	68
3.13. Характеристики лавинного фотодіода.....	70
3.14. Розробка схеми електричної принципової.....	72
3.14.1 Схема електрична принципова систем формування оптичних сигналів	73
3.14.2. Розрахунок параметрів систем формування оптичних сигналів	74
3.14.3 Схема електрична принципова підсистеми детектування.....	74
3.14.4 Розрахунок параметрів підсистеми детектування.....	76
3.14.5. Розрахунок номіналів компонентів понижуючого перетворювача напруг.	77
3.14.6. Методи з'єднання компонентів.....	79
3.15. Розробка друкованих плат.....	80
Висновки.....	81
4. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	83
4.1. Розробка корпусу системи	83
4.1.1. Особливість розміщення компонентів.	84
4.1.2. Поворотні механізми.....	86
4.2. Розрахунок конструктивних параметрів.....	88
Висновки.....	90
5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	91
Висновки.....	108
ВИСНОВКИ.....	109
Перелік використаної науково-технічної літератури.....	113

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

НБТ -	Наземний безпілотний транспорт
GPS -	Global position system – система глобального позиціонування;
LIDAR -	light detection and ranging – виявлення, ідентифікація і визначення дальності за допомогою світла
КВ -	Коефіцієнт відбиття;
АЦП -	Аналого-цифровий перетворювач;
ЦСП -	Цифровий сигнальний процесор;
LAS -	Файл LAS (скорочено від LASer, лазер) - бінарний формат для зберігання даних з лідару;
ЛФД -	Лавинний фотодіод;
ГІС	Геоінформаційна система
-	Інструменти редагування набір даних LAS
ArcGIS	Original equipment manufacturer - оригінальний виробник
-	обладнання
OEM -	
GNSS -	Global Navigation Satellite System - Глобальна навігаційна супутникова система
DPSS -	diode-pumped solid-state – напівпровідникове діодне накачування

Вступ

Останнім часом все частіше безпілотний транспорт використовується для рятувальних операцій, для матеріального постачання в важкодоступні місця, збирання інформації чи просто для використання безпілотного транспорту в побутових цілях. Застосування безпілотних апаратів значно спростить роботу та збільшить безпеку для людей, що приймають участь у різноманітних рятувальних або військових операціях.

Ринок безпілотних технологій знаходиться на стадії зародження, однак розвиток відбувається настільки стрімкими темпами, що не залишається сумнівів - безпілотне майбутнє вже настало. Так за прогнозами к 2028 році обсяг ринку роботизованих автомобілів складе мінімум 42 млрд. доларів, а частка робочарів в світових продажах досягне 13%. К 2030 р. – до 77 млрд доларів.

Зазвичай, на наземні безпілотні апарати встановлюються датчики:

- LIDAR - далекомір оптичного діапазону;
- Система стереозору;
- Система глобального позиціонування (GPS, ГЛОНАСС);
- Гіростабілізатори або системи інерційної навігації.

Кожна система датчиків є незамінною частиною НБТ, однак лазерний радар є одним з основних компонентів.

Лідар являє собою, як мінімум, активний далекомір оптичного діапазону. Скануючі лідари в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну картину навколишнього простору. Сталий переклад LIDAR як «лазерний радар» не цілком коректний, тому що в системах ближнього радіусу дії (наприклад, призначених для роботи в приміщеннях), головні властивості лазера: когерентність, висока щільність і миттєва потужність випромінювання - не затребувані, випромінювачами світла в таких системах можуть служити звичайні світлодіоди. Однак, для сканування та побудови 3д карти місцевості застосування лазерів неминуче.

Глобальний звіт про ринок LIDAR, опублікований компанією Variant Market Research, прогнозує, що до 2024 р. глобальний ринок досягне 1636 млн. дол. США; зростаючи щорічно на 20,8% з 2016 по 2024 рік. LIDAR може генерувати імпульси лазерного світла на поверхню і може надходити до 150 000 імпульсів в секунду, а повітряний прилад LIDAR використовує лазерний сканер зі швидкістю до 400000 імпульсів світла в секунду. LIDAR зазвичай використовується для виготовлення карт високої роздільної здатності із збільшенням застосування в археології, географії, геології, сейсмології, лісовому господарстві, картографічному лазерному картографуванні (ALSM) та інших. Зростання технологічного прогресу, збільшення використання безпілотників та застосування LiDAR в різних державних сферах, як очікується, призведе до розвитку ринку LiDAR.

					МП.171.081.006.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак недосконалість якості сканування та відтворення об'єктів, іноді повна неможливість ідентифікації об'єктів, висока ціна може сильно впливати на розвиток цього ринку. Тому основними завданнями цього проекту є:

- Аналіз сучасних аналогів систем моніторингу земної поверхні з визначення їх основних аспектів та недоліків. Порівняти сучасні аналоги за основними характеристиками і параметрами з метою визначення оптимальної системи сканування поверхні з рішенням основних проблем при їх експлуатації.
- Розробка основного блоку системи сканування, що забезпечить якісне сканування об'єктів лазерним випромінюванням на відстані до 150м та з можливістю прийому та обробки відбитих від об'єктів лазерних випромінювань.
 - Удосконалення системи розгортки для сканування земної поверхні заради збільшення відстані сканування, покращення кутової роздільної здатності та точності.
 - Модернізація системи сканування земної поверхні для наземного безпілотного апарату шляхом застосування додаткового блоку, що має деякі відмінності, що полягають в застосуванні пристроїв та методик, що використовують інші спектральні діапазони лазерного випромінювання. Це дасть змогу просканувати більш дрібні об'єкти. Також це дозволить значно вірогідніше визначити особливості поверхні, що сканується, зменшить помилки, покращить та розширить функціональність системи при різних умовах.
 - Розробити систему для визначення типів об'єктів за матеріалами з їх розподілом по ступеням загрози для НБТ, з подальшим проведенням заходів щодо його безпечної експлуатації як в пересіченій місцевості так і громадських місцях.
 - Проаналізувати основні конструктивні та технічні аспекти системи, за результатами яких побудувати 3D модель системи моніторингу земної поверхні з компактним та безпечним розміщенням елементів;
 - Розробка електричної схеми структурної та електричної схеми принципової системи моніторингу земної поверхні та його компонентів;
 - Провести дослідницький аналіз взаємодії лазерного випромінювання різної довжини хвилі з різними типами поверхні;
 - Провести маркетинговий аналіз ринку систем сканування з метою встановлення вартості та стратегії реалізації.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ НАЗЕМНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ ЛІДАРУ

Наземний безпілотний транспортний засіб (НБТ) - це транспортний засіб, який працює під час контакту із землею та без присутності на борту людини. НБТ можуть використовуватися для багатьох застосувань, де може бути незручно, небезпечно або неможливо присутність оператора-людини.

Безпілотна робототехніка активно розробляється як для цивільного, так і для військового призначення для виконання різноманітних монотонних, брудних та небезпечних операцій.

Як правило, апарат має набір датчиків для спостереження за навколишнім середовищем і буде або самостійно приймати рішення щодо його поведінки, або передавати інформацію людині-оператору в іншому місці, яке буде керувати транспортним засобом за допомогою телеоперацій.

Зазвичай, на наземні безпілотні апарати встановлюються датчики:

- Лідар;
- Система стереозору ;
- Система глобального позиціонування (GPS, ГЛОНАСС та ін.);
- Гіростабілізатори або системи інерційної навігації .

Кожна система датчиків є незамінною частиною НБТ і лідар є одним з основних компонентів.

Термін LIDAR (від англ. Light Detection and Ranging) відноситься до систем радіолокації, які працюють в оптичному діапазоні і використовують в якості джерела випромінювання лазер. Часто в зарубіжних джерелах можна зустріти аналогічні терміни - LADAR (Laser Detection and Ranging) і Laser Radar.

У мобільних наземних робототехнічних комплексах і наземних безпілотних апаратах (НБА) ця технологія відіграє дуже важливу роль: вона використовується для автоматичної побудови тривимірної карти (сцени) навколишнього простору і просторової орієнтації апарату.

Лідар - це активний оптичний сенсор, що випускає лазерні промені в сторону цілі під час руху транспортного засобу за спеціальними знімальними маршрутами. Віддзеркалене випромінювання лазера від об'єкта приймається і аналізується сенсором. Приймачі записують точний час, що минув з моменту випускання лазерного імпульсу системою до моменту його повернення, для того

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щоб обчислити відстань між сенсором і об'єктами, що скануються. Спільно з інформацією про внутрішнє і зовнішнє позиціонування (GPS і INS), ці відстані перетворюються в тривимірні точки, що відображають поверхню віддзеркалення лазерних імпульсів.

Точкові дані піддаються подальшій обробці після збору з урахуванням діапазону часу роботи лазера, кута сканування, координат GPS, інформації про внутрішній позиціонування (INS), що дозволяє отримати точні координати x , y , z .

Лазерні імпульси, що випускаються з лідару, відбиваються як від земної поверхні, так і від об'єктів, що знаходяться над землею: від будівель, рослинного покриву, стовпів і т. д. Один лазерний імпульс може віддзеркалюватись і повертатися до сенсора як один раз, так і декілька. Будь-який лазерний імпульс декілька разів відбивається при його русі до земної поверхні, розділяючись на стільки частин, від якої кількості поверхонь він відбився.

Перший повернутий сигнал є найбільш показовим і відповідатиме найближчому об'єкту ландшафту, такому як, наприклад, верхівка дерева або дах будівлі при скануванні цієї поверхні з повітря. Перший відбитий сигнал може також відповідати і земній поверхні. В цьому випадку лідаром буде захоплено тільки одне віддзеркалення.

В літальних апаратах, велика кількість повернень використовується для отримання висот декількох об'єктів, що знаходяться на шляху лазерного імпульсу. Відбиті сигнали з середини "спектра" зазвичай відповідають рослинності, а останні відбиті сигнали використовуються для моделей власне поверхні землі.

1.1.1 Атрибути точок лідару

Крім позиційних значень x , y і z системою зберігається також додаткова інформація. Для кожного лазерного імпульсу записуються і зберігаються такі атрибути: інтенсивність, номер відображення, кількість відбитих сигналів, значення класифікації точки, крайні точки лінії польоту, значення RGB, час GPS, кут і напрямок сканування. У наведеній нижче таблиці 1.1. описано атрибути, які можна отримати для кожної точки для літальних апаратів. При чому ці атрибути характерні як для літальних, так і для наземних безпілотних апаратів.

Таблиця 1.1. Атрибути точок лідару

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Атрибут лідару	Опис
Інтенсивність	Сила відображення лазерного імпульсу, відповідній лідарній точці.
Номер відбитого сигналу	Випромінюваний лазерний імпульс може створити до п'яти відбитих сигналів від об'єктів, від яких він відбивається і від можливостей лазерного сканера. Перший повернений імпульс буде позначений як відбитий сигнал номер один, другий - як номер два і т.д.
Кількість відбитих сигналів	Кількість повернених сигналів - це загальне число відбиттів даного імпульсу. Наприклад, дані точок можуть бути другими відбитими сигналами з п'яти відбитих променів.
Класифікація точок	Кожна надалі оброблена точка лідару може містити значення класифікації, яке визначає тип об'єкта, який відбив лазерний імпульс. Лідарні точки можуть бути класифіковані на кілька категорій, такі, в тому числі, як поверхня землі, верхня межа купола лісу і водна поверхня. Класів присвоюються цілочисельні значення кодів, що зберігаються в файлах.
Ребро лінії польоту	Точки відображаються в залежності від значення, яке дорівнює 0 або 1. Точки, що знаходяться на лінії польоту, мають значення, рівне 1, решта - рівне 0.
RGB	Даним лідару може бути присвоєно атрибут RGB. Ця атрибутивна інформація часто береться із зображень, які виходять одночасно з лазерної зйомкою.
GPS-час	Час GPS, відповідний моменту випромінювання імпульсу.
Кут сканування	Кут сканування - це значення в градусах з діапазону від -90 до +90. При 0 градусів лазерний імпульс випускається перпендикулярно і здійснюється зйомка по

	надир. При значенні, рівному -90 градусів, лазер випромінює імпульси вліво, а при $+90$ – вправо від літака в напрямку польоту. Більшість систем лазерного сканування працюють в діапазоні від -30 до $+30$ градусів.
Напрямок сканування	Напрямок сканування - це напрямок руху дзеркала скануючої системи в момент випускання системою лазерного сигналу. Значення, рівне 1, відповідає позитивному напрямку сканування, а рівне 0 - негативному. Позитивний напрямок означає, що сканер рухається зліва направо по напрямку польоту, а негативне - навпаки.

Оброблені надалі просторові організовані дані лазерної зйомки називають хмарою точок. Вихідні хмари точок - це величезні набори висотних 3D точок, що мають значення x , y , z , а також додаткову атрибутику, наприклад, час GPS. Конкретні поверхні, що відобразили сигнал, класифікуються за початкової обробки хмари точок. Висоти земної поверхні, будівель, покриву лісу, шляхопроводів та інших об'єктів, з якими стикається лазерний промінь, складають дані хмари точок. Ці дані характерні як для повітряних, так і наземних безпілотних апаратів.

1.1.2. Типи наземних лідарів

Існує два основних види наземних лідарів: мобільний і стаціонарний [1]. При мобільній зйомці система лідару встановлюється на рухомий транспортний засіб. При стаціонарній зйомці система лідару зазвичай встановлюється на штатив або інший нерухомий об'єкт. Обидві установки обладнані безпечними для очей лазерними установками.

Система наземної лазерної зйомки дозволяє отримувати дуже густо розташовані точки, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати об'єкти. Такі щільні хмари точок можна використовувати для управління спорудами і обладнанням, обстеження автомобільних і залізних доріг і навіть для створення тривимірних моделей міста, включаючи моделі не тільки міської забудови, а й внутрішніх приміщень будівель і споруд.

Мобільний лідар - це набір хмар точок лазерної зйомки, яка проводиться з використанням рухомої знімальної платформи. Системи мобільного лідару можуть включати різну кількість сенсорів, встановлених на час керування автомобілем. Такі системи можуть бути встановлені на автомобілях, поїздах,

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

морських і річкових суднах. Мобільні системи, як правило, складаються з лазерного сенсора, камер, GPS і INS (Внутрішньої навігаційної системи), так само як і системи лазерної аерозйомки.

Мобільний лідар може використовуватися для аналізу придорожньої інфраструктури, пошуку розташування порушень ліній електропередач, розміщення освітлювальних щогл, а також дорожніх знаків уздовж автомобільних і залізниць.

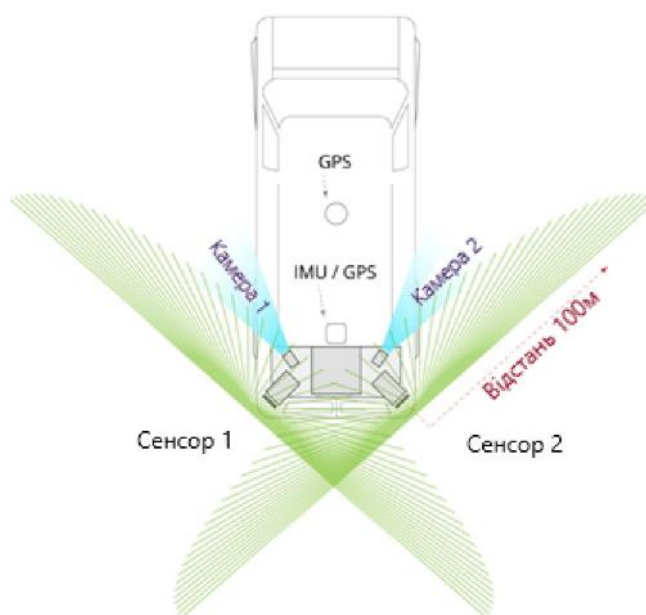


Рис. 1.1. Мобільний лідар [2].

Стационарний лідар - це набір хмар лідарних точок, отриманих з статичного положення. Зазвичай сенсор лідару встановлюється на штатив і має повністю автономну лазерну і фото-знімальну систему. Такі системи можуть отримувати хмари точок, здійснюючи лазерну зйомку як всередині будівель і споруд, так і зовні. Цей тип лідарної зйомки зазвичай застосовується при здійсненні інженерних пошуків, геодезичної зйомки та археології.

1.1.3. Компоненти системи лідар

Існують різні варіанти систем LIDAR, але в загальному випадку всі вони включають такі ключові елементи, що визначають принцип роботи системи:

- джерело фотонів (найчастіше це лазер або система лазерів);
- детектор фотонів;
- ланцюг тактування;
- оптична приймально-передавальна частина.

Системи LIDAR типу Time-of-Flight, ToF використовують короткі імпульси лазерного випромінювання, з високою точністю фіксуючи моменти їх передачі і прийому відгуків (відбитих сигналів), щоб обчислити відстані до об'єктів в навколишньому просторі або на поверхні землі (наприклад, при топозйомці з БПЛА). Після об'єднання серії таких вимірювань з інформацією про місцезнаходження і орієнтації апарату, створюється результуюча тривимірна сцена необхідної області простору. Найчастіше ця сцена зберігається у вигляді масиву координат (x, y, z), званого хмарою точок. На рисунку 1.2. показані основні компоненти системи лідар для сканування місцевості [2].

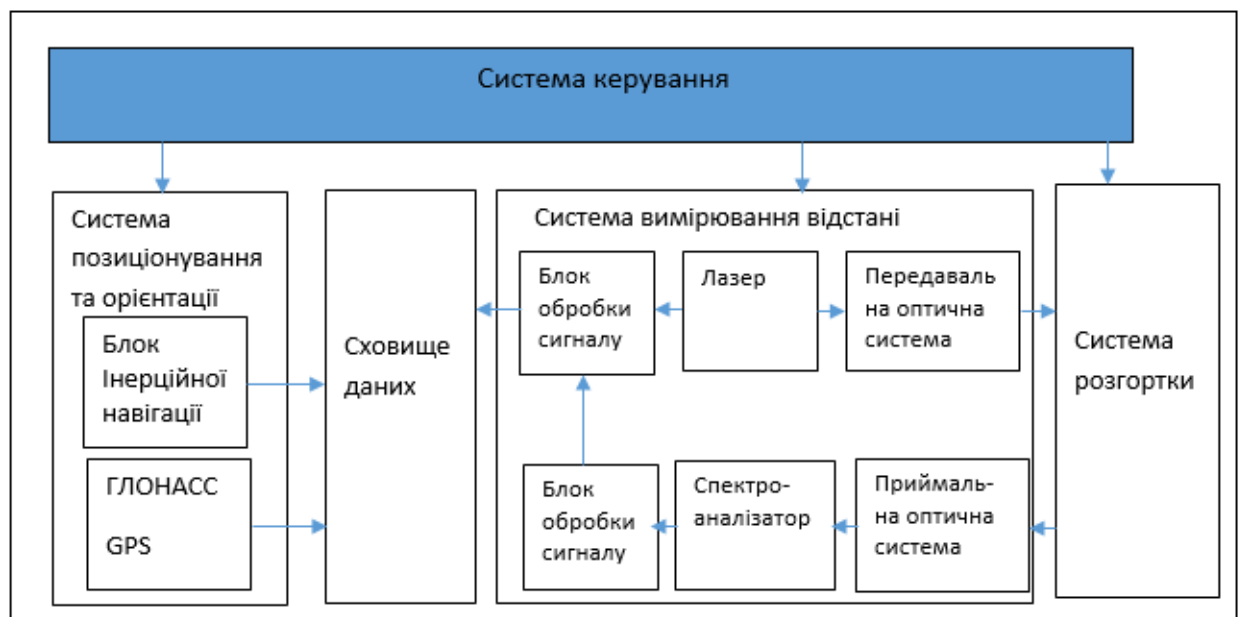


Рис. 1.2. Компоненти системи LIDAR [2].

Незважаючи на те, що існує безліч пристроїв LIDAR для різних областей застосування, всі вони складаються з схожого набору функціональних вузлів (рисунок 1.2.), таких як:

- підсистема вимірювання відстані (лазерний передавач і приймач);
- скануюча підсистема;
- підсистема позиціонування і орієнтації;
- система управління;
- сховище даних.

1.1.4. Система вимірювання відстані

Принципові відмінності окремих пристроїв LIDAR полягають в реалізації функції вимірювання відстані. Найважливіший вузол системи LIDAR - підсистема вимірювання відстані - складається, в свою чергу, з таких внутрішніх підсистем, як лазерний передавач і електрооптичний приймач. Лазерний передавач випромінює енергію у вигляді сфокусованого променя, який до виходу

з пристрою проходить через ряд перетворювальних компонентів: розширювачі променів, вихідна телескопічна оптика та інше. В системі LIDAR можуть використовуватися різні типи лазерів, але найчастіше застосовують твердотільні Nd: YAG-лазер, активним середовищем в якому виступає алюмо-ітрієвий гранат (Y3Al5O12), легований іонами неодиму та лазерні діоди. Лазерні скануючі далекоміри працюють на різних довжинах хвиль, але частіше за інших використовуються наступні:

- 1064 нм (ближній інфрачервоний діапазон) - для топографічних сканерів;
- 532 нм (зелений) - для батиметричних (вимірюють глибину) сканерів;
- 600-1000 нм - для наземних пристроїв, призначених для комерційного використання;
- ~1500 нм - для наземних скануючих систем, що використовуються в наукових цілях.

Вибір довжини хвилі лазерного випромінювача залежить від цілого ряду чинників:

- властивостей, що відображають скановані об'єкти;
- характеристик навколишнього середовища;
- чутливості використовуваного детектора;
- необхідного ступеня безпеки для очей;
- вимог до конструкції пристрою.

Крім довжини хвилі випромінювання потрібно також враховувати потужність лазера. Електрооптичний приймач отримує енергію лазерного променя, відбитого або розсіяного, і фокусує її на світлочутливому детекторі за допомогою вхідної оптики.

1.1.5. Методи визначення відстані

Зафіксовані значення моментів передачі і прийому лазерного променя використовуються для розрахунку часу, проведеного світлом в дорозі, і, отже, відстані до об'єкта, який відбив промінь. В системі LIDAR зазвичай використовується один з двох режимів, що визначають метод вимірювання відстані: імпульсний режим або режим безперервної хвилі. У системах з імпульсною модуляцією, також відомих як час прогонової системи, лазером випромінюються поодинокі світлові імпульси з високою частотою проходження. Вимірюється час, що минув з моменту випромінювання імпульсного сигналу до моменту повернення відгуку в приймач. Відстань до точки поверхні об'єкта, в

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якій сталося відображення лазерного променя, може бути обчислено за формулою 1.1.:

$$D = 0,5 \cdot c \cdot t, \quad 1.1.$$

де c - швидкість світла, t - повний час проходження світлом шляху до точки відображення і назад (раундтріп), D - шукана відстань до точки відображення.

У системах з безперервною хвилею лазер випромінює безперервний сигнал, до якого потім застосовується синусоїдальна амплітудна модуляція. В цьому випадку час проходження світлом повного шляху від передавача до приймача буде прямо пропорційно зсуву фаз в випромінюваному і прийнятому сигналах:

$$t = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} \cdot T \quad 1.2.$$

де φ - фазовий зсув, T - період сигналу.

Після визначення часу t проходження променя, відстань D , як і в першому випадку, обчислюється за формулою (1.1.). Для зниження невизначеності може бути використана багатотонава синусоїдальна модуляція. Також в системах з безперервною хвилею використовується альтернативний метод - з лінійною частотною модуляцією.

1.1.6. Система розгортки для сканування

У тих випадках, коли необхідно не просто визначити відстань до об'єкта, а зробити огляд цільової області, система LIDAR повинна проводити вимірювання в безлічі точок. Для побудови сцени цільової області простору використовується комбінація руху LIDAR-пристрою в цілому і роботи підсистеми розгортки, через яку проходить оптичний сигнал, що випромінюється. Поширений варіант реалізації підсистеми розгортки заснований на використанні хитного дзеркала. Послідовна зміна напрямку лінії візування, уздовж якої випромінюється оптичний сигнал, здійснюється за допомогою рухомого дзеркала. Це дзеркало повертається на обмежений кут (кут огляду) навколо осі, що лежить на його площині і, як правило, паралельно напрямку руху пристрою. Хитання дзеркала дозволяє сканувати цільову область простору і формувати сцену потрібної ширини, яка визначається кутом гойдання дзеркала (Рис. 1.3.) [2].



Рис. 1.3. Система розгортки з хитним дзеркалом

Підсистема на основі хитного дзеркала створює синусоїдальну розгортку. При цьому частота коливання обернено пропорційна заданому куту огляду (ширині сцени). Основний недолік такого способу розгортки - непостійна швидкість руху дзеркала.

Лазерний промінь переходить від однієї грані призми до іншої стрибкоподібно, в результаті чого масив точок, що формується при русі пристрою, складається з ряду паралельних ліній (Рис. 1.4.) [2] .



Рис. 1.4. Система розгортки з обертовою призмою

Цей варіант позбавлений недоліків хитного дзеркала, проте він складніше в реалізації і в тому, що стосується обробки результатів вимірювань. Системи LIDAR з обертовою призмою виробляє австрійська фірма Riegl [2]. Третій варіант підсистеми сканування використовує обертове дзеркало. Вісь обертання в цьому варіанті розташована майже перпендикулярно до поверхні дзеркала (Рис. 1.5) [2].



Рис. 1.5. Скануюча система з обертовим дзеркалом

За рахунок відхилення поверхні дзеркала від площини, перпендикулярної до осі обертання, формується розгортка відбитого лазерного променя у вигляді еліптичної кривої. Перевага методу полягає в тому, що кожна точка простору сканується двічі. Разом з тим еліптична розгортка значно ускладнює обробку результатів сканування, так як обробка подвійних вимірювань є досить складним завданням. Крім того, оскільки точки в одній і тій же області отримані з різних позицій (так як система рухається і змінює орієнтацію в просторі), отримана таким способом хмара точок може містити велику кількість «шумів» [5].

1.1.7. Система позиціонування і орієнтації

Для практичного використання інформації, отриманої за допомогою скануючих лазерних далекомірів, одного тільки масиву значень відстані від пристрою до об'єктів і величин відносних кутів сканування недостатньо. Достовірність даних про навколишній простір (одержуваних у вигляді тривимірного хмари точок або двовимірного зображення з даними про відстані) може бути досягнута тільки за умови, що для кожної точки вимірюють абсолютні значення положення і орієнтації несучої платформи системи LIDAR в просторі в момент прийому відгуку від імпульсу. Для таких вимірів використовується підсистема орієнтації і позиціонування. Ця підсистема включає в себе два основних компоненти: приймальний модуль системи глобального позиціонування (ГЛОНАСС або GPS) і блок інерціальної навігації (IMU) (Рис 1.6.). Дані GPS-приймача використовуються для запису розташування несучої платформи в певні моменти часу. З безлічі існуючих методів уточнення GPS-координат, в системах LIDAR, як правило, застосовується диференціальна постобробка сигналу зі стаціонарної базової станції або диференціальні поновлення в реальному часі.



Рис. 1.6. Основні пристрої для моніторингу місцевості [2].

1.1.8. Сховище даних LAS

Кінцеві дані LIDAR представляють собою файли зі значеннями координат GPS і IMU, з вимірними значеннями відстаней і іноді з інформацією від інших підсистем. Оскільки системи LIDAR можуть генерувати дуже великі обсяги даних, в системі передбачений накопичувач, на який дані зберігаються відразу після збору.

Набір даних LAS зберігає посилання на один або кілька файлів LAS на диску, а також на додаткові об'єкти поверхні. Файл LAS - це галузевий стандартний бінарний формат для зберігання бортових лазерних даних. Набір даних LAS дозволяє швидко і легко вивчати файли LAS в їх вихідному форматі, надає деталізовану статистику і область покриття лідарних даних, що містяться в файлах LAS.

Набір даних LAS (LAS dataset) [3] може також зберігати посилання на класи просторових об'єктів, що містять обмеження поверхні. Обмеженнями поверхні є лінії розломів, полігональні водні об'єкти, кордони областей або будь-які інші типи об'єктів поверхні, який включений в набір даних LAS.

Файл LAS містить хмари лазерних точкових даних (Рис. 1.7.).

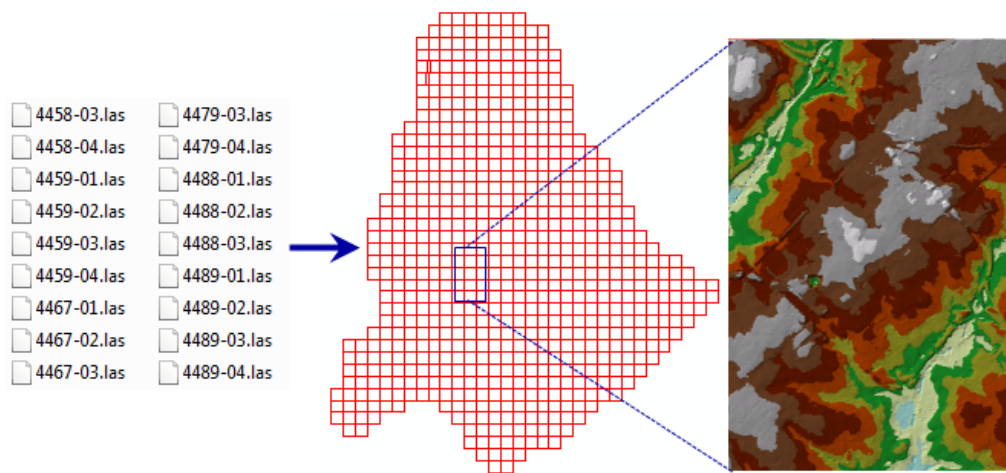


Рис. 1.7. Хмара лазерних точкових даних[3].

Представлений нижче список включає в себе прості приклади того, яким чином правильно використовувати набори даних LAS з метою впровадження даних лідару в геоінформаційній системі (ГІС).

- Зберігати посилання на велику кількість файлів LAS і даних про поверхні в одному конкретному проекті;
- Швидко відображати дані лідару як хмари точок або у вигляді триангульованої поверхні в 2D і 3D;
- Візуально порівнювати лазерні точки з існуючими даними ГІС для перевірки даних при побудові нових даних;
- Швидко проводити статистичний аналіз LAS-файлів і лазерних точок;
- Проводити початкові процедури QA \ QC, як, наприклад, оцінка покритої даними території і щільності точок, для знову отриманих лідарних матеріалів;
- Редагувати класифікацію точок LAS;
- Використовувати додаткові структурні лінії і інші об'єкти поверхонь з даними лідару.
- Створювати додаткові поверхні, наприклад DEM і DSM (інструмент геообробки набір даних LAS в растрі (LAS Dataset To Raster)) або TIN (інструмент геообробки набір даних LAS в TIN (LAS Dataset To TIN)).
- Створювати карти інтенсивності за допомогою інструменту геообробки набір даних LAS в растрі (LAS Dataset To Raster).
- Інтерактивно оцифровувати нові об'єкти з використанням точок набору даних LAS і інструментів редагування ArcGIS.

- Здійснювати оновлення за допомогою знову отриманих даних LAS або даних поверхонь.
- Викладати дані LAS для спільного використання зібраних наборів даних мозаїки.
- Оцінювати просторовий розподіл різних показників лазерних даних з використанням інструменту геообробки статистики точок LAS в растрі (LAS Point Statistics As Raster).

1.2. Порівняння сучасних лідарних систем

Лазерний далекомір став одним з ключових компонентів, що дозволив зробити автомобіль по-справжньому автономним.

Пристрій, встановлений на даху безпілотного автомобіля (Рис. 1.6), генерує детальну тривимірну карту навколишнього простору. Бортний комп'ютер об'єднує дані вимірювань, отриманих з LIDAR, з картами високої роздільної здатності, формуючи різні моделі даних, які дозволяють роботизованому автомобілю пересуватися самостійно, уникаючи зіткнень з перешкодами і не порушуючи правил дорожнього руху [6].

1.2.1. Лідар HDL-32E

HDL-32E створює 3D-зображення на 360 ° за допомогою 32 пар лазерів / детекторів, корпус якого швидко крутиться для сканування навколишнього середовища.

Ця конструкція дозволяє лазерам робити кожне випромінювання тисячі разів на секунду, забезпечуючи насичену тривимірну хмару точок.

Цифрова обробка сигналу та аналіз хвилі забезпечують високу точність, розширення зондування та дані про інтенсивність.

HDL-32E використовує моторну систему прямого приводу, не використовуючи ременів і ланцюгів у приводі, щоб підвищити надійність і зменшити обслуговування (Рис 1.7.).



Рис 1.7. Зовнішній вигляд лідару HDL-32E [6].

					МП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Агрегат забезпечує:

- Горизонтальне поле зору 360 ° (FOV);
- Вертикальне поле зору на 41,3 °;
- Дальність сканування до 80 метрів;

Датчик може бути встановлений під будь-яким кутом від 0 ° до 360 ° по відношенню до бази датчика.

Датчики зазвичай використовуються в транспортних засобах, де стандартна потужність 12 вольт, 2 ампера.

Датчик HDL-32E не потребує конфігурації, калібрування чи інших налаштувань, щоб почати генерувати точні дані. Після того, як пристрій змонтований та заживлений, він почне сканувати та виробляти пакети даних.

На рис. 1.8. зображений знімок, зроблений цим лідаром.

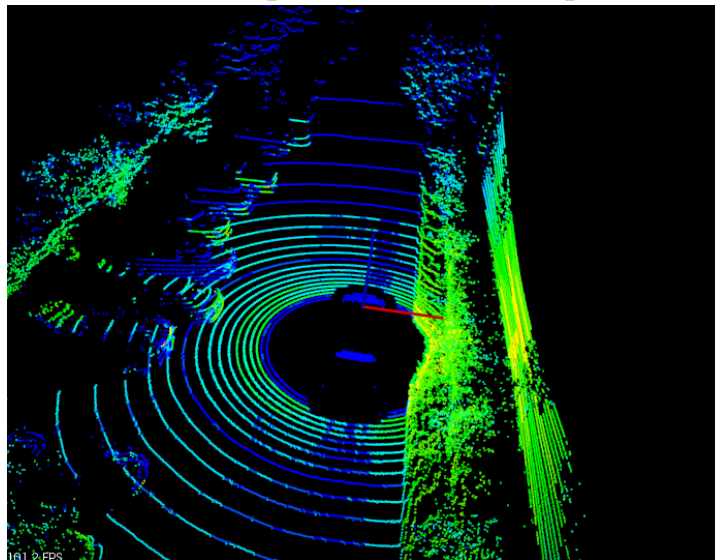


Рис. 1.8. Знімок, зроблений лідаром HDL-32E [3]

Як видно зі знімку об'єкти з незначною деталізацією відобразилися досить непогано, однак менш дрібні та об'єкти з більшою деталізацією такі як рослинність відобразилися лише частково. Неможливо на 100% візуально ідентифікувати ці об'єкти, а отже не зрозуміло де знаходяться тверді та небезпечні для безпілотної елементи .

Основні параметри і характеристики лідару HDL-32E

- Подвійне повернення;
- ± 4 см точності;
- 1 кг (плюс 0,3 кг для маркування);
- 32 канали;
- Дальність 80м-100м;

- До $\sim 1,39$ мільйона точок за секунду;
- 360° горизонтальне поле зору;
- $+10^\circ$ до -30° по вертикалі поле зору;

1.2.2. Лідар HDL-64E

Модель далекоміра HDL-64E має 64 пари випромінювач-детектор, які забезпечують наявність рівновіддалених секторних полів огляду по $26,5^\circ$. Для забезпечення 360-градусного огляду по азимуту весь оптичний блок закріплений на обертовій підставці (Рис. 1.9.) і обертається з частотою 600 обертів в хвилину.

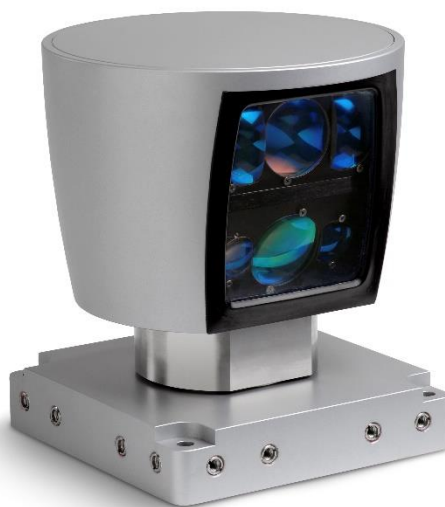


Рис. 1.9. Лідар HDL-64E [28]

При необхідності ця частота регулюється в діапазоні 300 ... 900 об / хв шляхом передачі простої текстової команди через послідовний інтерфейс. Цей же послідовний порт може бути використаний для оновлення прошивки сканера. Далекомір має максимальний діапазоном вимірювання відстані - до 100 м з похибкою не більше 4 см [7]. Незалежно від частоти обертання оптичного блоку, пристрій постійно генерує великий обсяг даних - 1 млн точок в секунду, що відповідає горизонтальній роздільній здатності $0,05^\circ$. Пристрій досить збалансований, що зводить до мінімуму вплив вібрації і забезпечує стабільне зображення сцени. Кожен лазер далекоміра HDL-64E випромінює оптичний імпульс тривалістю 5 нс (на рівні 50% амплітуди з максимальною піковою потужністю 60 Вт). Висока напруга, необхідна для створення пікового струму у випромінювачі на рівні 30 А, генерується схемою перетворювача, що дозволяє використовувати для живлення лазерної установки низькі напруги. Вихідний лазерний промінь фокусується лінзами. При попаданні на ціль частина випромінювання відбивається назад в напрямку джерела.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це відбите світло проходить через окрему систему лінз і УФ-фільтр, необхідний для зниження фонового оптичного засвічення (збільшення відношення сигнал / шум). Лінзи прийомної системи фокусують відбите випромінювання на лавинний фотодіод, що генерує електричний сигнал, пропорційний інтенсивності оптичного. Лазер і лавинний фотодіод юстуються на заводі-виробнику для забезпечення максимальної чутливості при мінімізації перехресних сигнальних перешкод, утворюючи, таким чином, найбільш ефективну пару випромінювач-детектор. Відповідно до сили відбитого сигналу, детектуемого лавинним фотодіодом і схемою підсилювача, система змінює амплітуду лазерного імпульсу, підтримуючи мінімальний необхідний рівень випромінювання. Ця автоматична підстроювання потужності лазера, по-перше, знижує нагрів оптичного блоку і підвищує його надійність, а по-друге, не дає детекторам увійти в режим насичення. В іншому випадку, при отриманні детектором занадто великої кількості оптичної енергії, наступав би режим насичення, для виходу з якого детектору потрібно чимало часу (якщо воно перевищує період проходження імпульсів, це неминуче призводить до спотворення детектуемого сигналу). По-третє, якщо рівень сигналу можна порівняти з шумом, що ускладнює його детектування, система автоматично підвищує рівень потужності лазерного випромінювання. Це може відбуватися, наприклад, в разі наближення до порогу чутливості (120 м) або при слабкому відображенні від чорної матової поверхні.

На рис. 1.10. зображений знімок, зроблений лідаром HDL-64E .

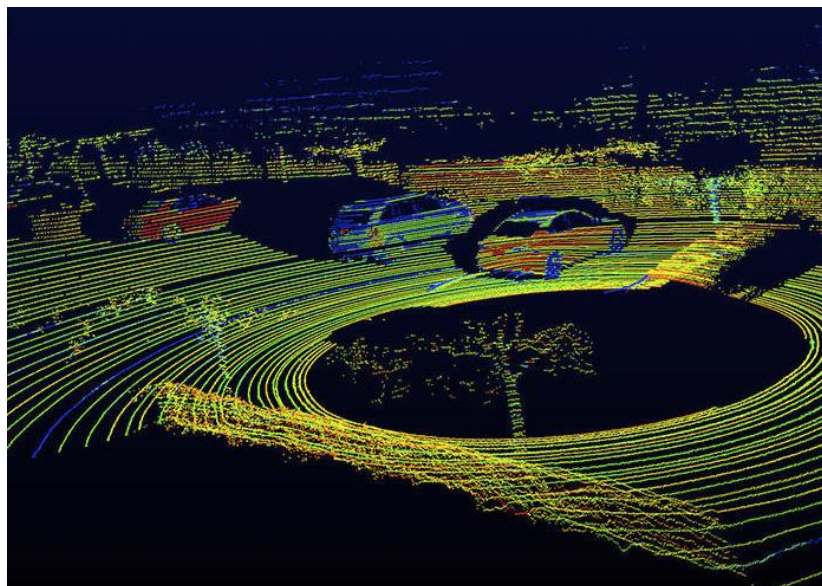


Рис. 1.10. Знімок, зроблений лідаром HDL-64E [28].

Як видно зі знімку, маємо трохи кращу якість відтворення об'єктів ніж HDL-32E, однак все одно наявні вади у відтворенні деталізованих та малих об'єктів, особливо рослинність. Можна зазначити більший радіус сканування.

					МП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні параметри і характеристики лідару HDL-64E

- 64 канали;
- Відстань до 120м;
- До ~ 2,2 мільйонів точок за секунду;
- Горизонтальне поле зору: 360 °;
- Вертикальне поле зору: 26.9 °;
- Горизонтальна кутова роздільна здатність: 0,08 ° (азимут);
- Вертикальна кутова роздільна здатність: ~ 0,4 °
- Вибір користувачем частоти кадрів

1.2.3. Лідар RS-LiDAR-32

RS-LiDAR-32 - це серія масових продуктивних твердотільних гібридних 32-проміньних лідарів, нещодавно розроблених RoboSense [6].

Ця серія включає 2 вироби: RS-LiDAR-32A та RS-LiDAR-32B, обидва розроблені відповідно до вимог OEM, що вимагають підвищення продуктивності у швидкісних умовах руху та меншої площі. Лазерні головки симетрично вистелені з меншим міжпростором у середній частині та більшим міжпростором на обох кінцях. Таке компонування гарантує більш цілеспрямований збір даних. Мінімальна вертикальна кутова роздільна здатність серії RS-LiDAR-32 становить 0,33 °, що реєструє найменший вертикальний кутову здатність серед двох попередніх аналогів. На рис. 1.11. зображений зовнішній вигляд лідару RS-LiDAR-32[6].



Рис 1.11. Зовнішній вигляд лідару RS-LiDAR-32

RS-LiDAR-32 має максимальний теоретичний діапазон вимірювання 180 метрів, що дозволяє отримати менше ніж 1-секундний час відгуку для автомобілів зі швидкістю 100 км / год на дорозі та забезпечує безпечний рух у високошвидкісних умовах автономного водіння.

					МП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діапазон вимірювань на 180 метрів RS-LiDAR-32 дає більше часу відгуку для автономних транспортних засобів у високошвидкісних умовах автономного водіння.

На рис. 1.12. зображений знімок, зроблений лідаром RS-LiDAR-32.

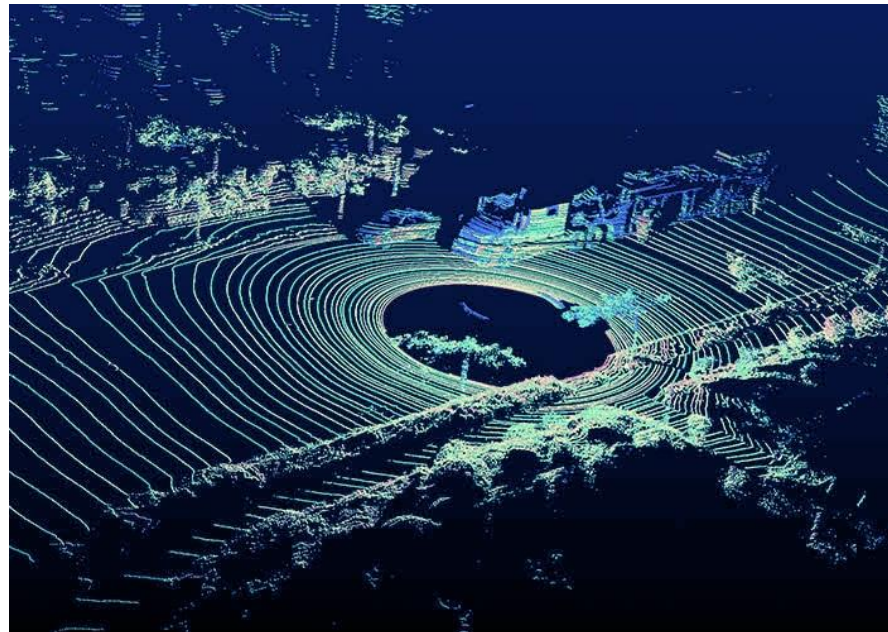


Рис. 1.12. Знімок, зроблений лідаром RS-LiDAR-32 [6].

Одразу видно більший радіус сканування. Краще проявлені деталізовані об'єкти такі як дерева, кущі, однак не без похибок. Наявні об'єкти, які взагалі не можна ідентифікувати.

Основні параметри і характеристики лідару RS-LiDAR-32

- Промінь лазера: 32 канали (променів);
- Довжина хвилі: 905 нм;
- Клас лазера: клас1;
- Точність: ± 3 см;
- Дальність дії: 0,2м до 180м;
- Швидкість передачі даних: 640 000ps / s;
- Поле зору (вертикальне): RS-LiDAR-32A: 30°, RS-LiDAR-32B: 40°;
- Кутова роздільна здатність (вертикальна): мінімум 0,33°;
- Поле зору (горизонтальне): 360°;
- Кутова роздільна здатність (горизонтальна): 0,14°– 0,36° (при частоті обертання 5-20Гц);
- Вхідна напруга: 9-32В постійного струму;
- Споживана потужність: 13,5 Вт;
- Захист датчика: IP67;
- Робоча температура: -10 ~ 60 ° C;

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розмір: RS-LiDAR-32A: 115мм * 95,7мм;
- RS-LiDAR-32B: $\varnothing 115\text{мм} * 110,5\text{мм}$;
- Вага: RS-LiDAR-32A: 0,92 кг RS-LiDAR-32B: 1,0 кг;
- Тип даних: просторові координати / інтенсивність

1.2.4. Лідар TRIMBLE MX2

Trimble MX2 - це вмонтована на автомобілі система зйомки об'ємних зображень, в якій поєднуються лазерне сканування з високою роздільною здатністю і позиціонуванням хмар точок з високою точністю, для широкого діапазону використання. Система може бути швидко змонтована на автомобілі або іншому транспортному засобі, і так само швидко демонтована (Рис. 1.13.). Вона значно скорочує вимоги до його кваліфікації, в порівнянні з традиційною технікою [8]. Мобільний сканер Trimble MX2 підтримується офісним програмним забезпеченням Trident, що дозволяє швидко взяти і аналізувати сирі дані сканування, і перетворити їх в достовірну і високоточну тривимірну цифрову модель місцевості.



Рис. 1.13. Лідар Trimble MX2 та його компоненти

Система має три основних елементи:

Головка датчика.

Прилад з високим ступенем захищеності адаптований для монтажу на будь-яких транспортних засобах. Він містить одну або дві лазерних головки, і інтегрований з GNSS і інерціальним модулем геоприв'язки Trimble Applanix для високоточного позиціонування. Двоголовкова система має конфігурацію "метелик", яка використовується в лазерному скануванні для мінімізації затінення. Головка датчика може бути встановлена за кілька хвилин на будь-який транспортний засіб.

Консоль оператора

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функції управління системою і збереження даних виконуються програмним забезпеченням Trimble Trident Capture, інстальованим в захищеному польовому комп'ютері. Програмне забезпечення Trimble Trident Capture має чіткий, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє оператору швидко встановлювати параметри системи і керувати записом даних.

Для швидкої трансформації хмар точок в геопросторову цифрову модель, в системі використовується програмний комплекс Trimble Trident [8]. Концентратор зображень Trident Imaging Hub вбудований в систему і забезпечує позиціонування об'єктів, вимір і створення шарів даних. Додаткове програмне забезпечення Trident Factory забезпечує високий рівень автоматизації і оптимізовано для більш складних процесів. Для більш складних опцій постобробки додається програмне забезпечення Arplanix POSpac MMS.

Можливість запису до 72 000 точок в секунду (в двоголовковій конфігурації сканера) при високій точності геоприв'язки, що забезпечується за рахунок GNSS / інерційної технології Trimble Arplanix.

На рис. 1.14. зображений знімок, зроблений лідаром Trimble MX2 [7].

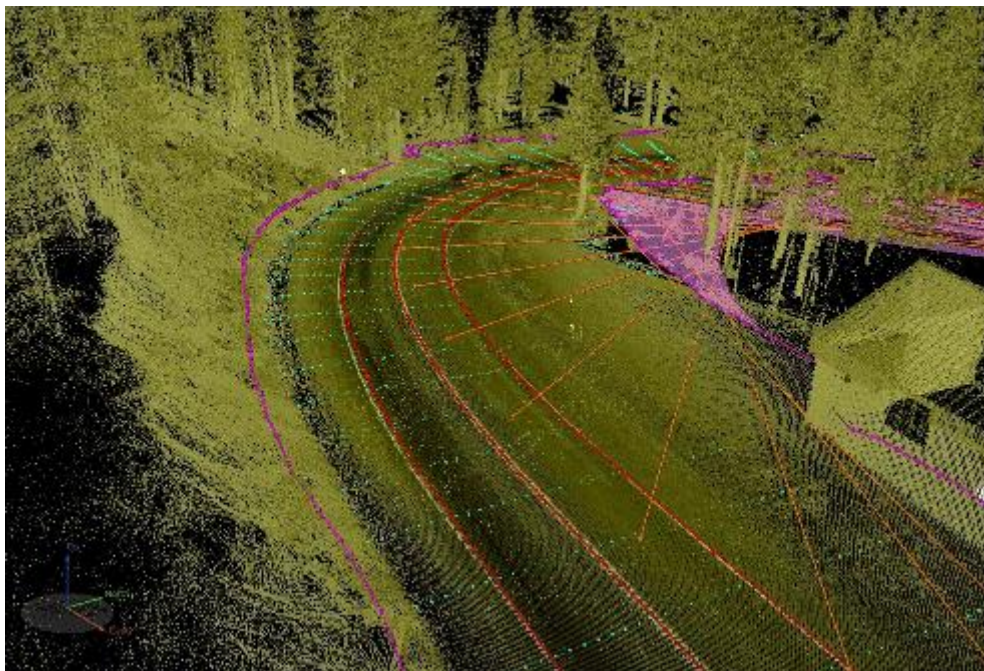


Рис. 1.14. відтворена 3D карта, зроблена лідаром Trimble MX2.

Згідно цього рисунку можна впевнитись, що цей лідар найкраще відображає усі типи об'єктів на досить значній відстані та майже з повним полем зору. Однак необхідно взяти на увагу те, що це найдорожчий лідар, що зазвичай використовується в великих безпілотних апаратах. Також, навіть в цьому випадку є невизначені певні ділянки карти. Також береться до уваги і значні його габарити і маса.

Основні параметри і характеристики лідару Trimble MX2:

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Робоча температура: від -10 до +50 ° C;
- Блок живлення: від 12 до 32 В постійного струму;

- Екологічний рейтинг: IP65;

- Вага:

Одна головка лазера: 17 кг;

Подвійна лазерна головка: 25 кг;

- 360-градусна панорамна камера;

- Тип одно- або подвійних лазерів SLM-250 класу 1;

- Дальність дії до 200м;

- Точність ± 1 см на 50 м для білої картки Kodak5;

- Сканер FOV 360 градусів;

- Частота сканування:

Одинична головка лазера: 20 Гц (1200 об / хв);

Подвійна лазерна головка: 2 x 20 Гц (1200 об / хв);

- Кількість точок за секунду:

Одинарна голова лазера: 36000 точок в секунду;

Подвійна лазерна голова: 72 000 точок в секунду;

- Частота імпульсів:

Одинарна головка лазера: 36 кГц;

Подвійна лазерна головка: 2 x 36 кГц.

В табл. 1.15. порівнюються 4 сучасні аналоги лідарів за основними особливостями та параметрами. Зірочкою (*) показані найкращі показники, двома зірочками (**) – найгірші.

Модель лідару	HDL-32E	HDL-64E	RS-LiDAR-32	Trimble MX2
Кількість каналів (променів)	32	64	32	220*
Вхідна постійна напруга, В	9-32	12-32	9-32	12-32
Споживана потужність, Вт	12*	60**	13,5	13
Вага пристрою, кг	1.3	12.7	1 *	25 **
Максимальна відстань сканування, м	80**	120	180	240*
Точність, \pm см	4**	3	3	2*
Вертикальне поле зору, °	-10.67 до 30.67	+2.0 до -24.9	-5 до 35	325*

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кутова роздільна здатність вертикальна, °	0.43	0.4**	0,33*	0, 35
Горизонтальне поле зору, °	360	360	-360	325**
Кутова роздільна здатність горизонтальна, °	0.1-0.4	0.08-0.35*	0,14– 0,36	0,34
Швидкість обертання головки (сканування), Гц	5-20	5-20	5-20	20
Кількість точок даних за секунду	695,000	1,300,000 *	640 000	72 000**
Робоча довжина хвилі, нм	905	905	905	905
Робоча температура, ° С	- 10 до +60	- 10 до +60	-10 до + 60	-10 до +50**
Габарити, см: - Довжина - Ширина - Висота	8.5* 8.5 14.4	21.5 21.5 28.3	11.5 11.5 9.57	54.2** 26.2 25.1
Ціна, грн (на осінь 2019)	~700000	~ 1500000	~495000- 550000	~1800000**

Проаналізувавши основні параметри усіх чотирьох аналогів, можна зазначити такі основні переваги та недоліки кожного лідару.

1.2.5. Основні переваги та недоліки лідарів

HDL-32E

Переваги:

- Найменша споживана потужність, а отже, і витрати енергії;
- Невелика вага;
- Найменший за габаритами серед усіх;
- Досить відомий розробник, який активно підтримує пристрій за рахунок частих оновлень як апаратно, так і програмно.

Недоліки

- Найменша відстань сканування як теоретично так і на практиці;
- Найгірша точність та якість відображення об'єктів ;
- За рахунок того, що лідари є досить новою технологією дуже висока ціна;

HDL-64E

Переваги:

- 64 канали, променів сканування;
- Високий показник горизонтальної кутової роздільної здатності;
- Найбільша кількість точок даних за секунду;
- Досить відомий розробник, який активно підтримує пристрій за рахунок частих оновлень як апаратно, так і програмно.

Недоліки

- Дуже велика, на відміну від інших, споживана потужність;
- Найгірший показник вертикальної кутової роздільної здатності;
- За рахунок того, що лідари є досить новою технологією дуже висока ціна.

RS-LiDAR-32

Переваги:

- Найменша вага пристрою;
- Маленькі габарити;
- Найкращий показник вертикальної кутової роздільної здатності;
- Найменша ціна серед усіх аналогів.

Недоліки

- 32 канали, це менше ніж в більшості аналогів;
- Не дивлячись на найменшу ціну серед інших аналогів, вона все одно досить значна;

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Trimble MX2

Переваги:

- Набагато більша кількість каналів (променів) сканування;
- Найбільша відстань та радіус сканування;
- Найвища точність сканування;
- За рахунок конструктивних особливостей, поле зору сканування майже утворює повну сферу, а отже захоплює майже всю місцевість;
- Не дивлячись на високий функціонал, невелике споживання енергії.

Недоліки

- Дуже велика вага пристрою та габарити, що не підійде невеликим безпілотним апаратам;
- Горизонтальне поле зору має неповне коло;
- Невелика кількість точок даних за секунду;
- Трохи гірші експлуатаційні показники такі як робоча температура та зручність використання;
- Найвища ціна серед усіх аналогів.

Висновки

Цей огляд був спрямований на пошук та дослідження найкращих сучасних прикладів систем сканування земної поверхні на основі лідарів з урахуванням усіх конструктивних, електричних, технологічних та функціональних аспектів.

Система сканування має багато компонентів та пристроїв, однак лідар є найважливішим в безпілотному апараті, що визначає траєкторію руху апарату, шляхом сканування навколишньої місцевості. Було досліджено такі основні аспекти роботи лідару як:

- Процес випромінювання та прийом масиву сигналів з лазерних випромінювачів;
- Основні атрибути лідару за якими будується тривимірна карта та визначаються параметри об'єктів, що були проскановані та відтворені на цій карті;
- Основні компоненти лідару;
- Методики визначення відстані від лідару до об'єктів, що скануються;
- Використання підсистеми розгортки, орієнтації та позиціонування;
- Використання сховище даних;

Розглянувши переваги та недоліки існуючих лідарів і враховуючи поставлене завдання, електронна система сканування поверхні, що розроблюється в даній магістерській роботі буде використовувати наступні технічні рішення.

Це система, що скрадатиметься як мінімум з 32 каналів, що випромінюють в інфрачервоному діапазоні. Система розгортки буде складатися з рухомих

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дзеркалів, утворюючи синусоїдальну розгортку. У якості приймача будуть лавинні фотодіоди, які перетворюють фотонний сигнал в аналоговий електричний, який потім перетвориться на масив цифрових імпульсів за допомогою АЦП. Всі дані будуть зберігатися в сховищі даних. Ці системи будуть компонувати з малим безпілотним наземним транспортом з напіваавтономним режимом керування, що виконується з використанням декількох радіо передавальних пристроїв та автономною системою навігації, що був об'єктом роботи [4].

Було досліджено чотири сучасних лідарних систем, де були виявлені їх основні недоліки та проблеми згідно аналізу параметрів та побудованих ними карт. Основною проблемою є недосконале відтворення деталізованих та малих об'єктів або зовсім їх відсутність та неможливість ідентифікувати візуально деякі з них. Це створить велику проблему для подальших дій НБТ в навколишній місцевості з виникненням небезпеки як для нього так і для оточуючих. Крім того у всіх аналогів використовується лише одна методика вимірювання та сканування, це може призвести до виникнення помилок у відтворенні об'єктів, наприклад є об'єкти, що майже не взаємодіють з ІЧ-випромінюванням.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ ВІД ДОВЖИНИ ХВИЛІ ЛАЗЕРА

В цьому підрозділі буде досліджено одразу три спектральні діапазони лазерного випромінювання, що дасть змогу використати їх для системи моніторингу земної поверхні. В звичайних лідачах використовується лише один діапазон випромінювання – це ближній ІЧ, що створює ряд недоліків та похибок при скануванні, як було зазначено раніше. Тому дослідження та використання інших спектральних діапазонів дозволить використати ефективну методику моніторингу земної поверхні з визначенням типів матеріалів.

- Інфрачервоне випромінювання. Весь діапазон інфрачервоного випромінювання умовно ділять на три області:

ближня: $\lambda = 0,74-2,5$ мкм;

середня: $\lambda = 2,5-50$ мкм;

далека: $\lambda = 50-2000$ мкм [5].

Ближній ІЧ-діапазон є широко використовуваний в лідачах за рахунок того, що здебільшого речовини в природі не пропускають ІЧ-випромінювання, а отже спостерігається високий коефіцієнт відбиття і малі втрати енергії. З іншого боку проходячи через повітряні прошарки, ІЧ-промені не поглинаються молекулами кисню та азоту, тому втрат енергії та розсіювання лазерного пучка також майже немає. Однак це стосується не всіх матеріалів та речовин. Коефіцієнт відбиття (КВ) змінюється в залежності від матеріалу.

Так як вода є одна із найпоширеніших речовин і є досить небезпечною для апаратури НБТ, потрібно розуміти взаємодію лазерного випромінювання (ЛВ) різних довжин хвиль. На рис. 2.1. зображені знімки водойми в нормальному видимому світлі (зліва) і ближньому інфрачервоному світлі (праворуч) [6].



Рис. 2.1. Знімки водойми в нормальному видимому світлі (зліва) і ближньому інфрачервоному світлі (праворуч)

Як видно зі знімку, в ІЧ світлі неможливо зрозуміти не тільки глибину водойми, а й взагалі створюються проблеми ідентифікації води серед інших поверхонь. Басейн виглядає яскравіше на фото видимого світла, оскільки більше світла пропускається через воду і менше поглинається. Для підтвердження цього на рис. 2.2. зображена залежність коефіцієнта поглинання води від довжини хвилі ЛВ .

Як видно з графіку, зі збільшенням довжини хвилі збільшується коефіцієнт поглинання (якщо брати початкову точку 450 нм). Так, ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі більше 1 мкм не проникає через товщу води в кілька сантиметрів. Тому в ІЧ-діапазоні буде проблематично ідентифікувати НБТ воду.

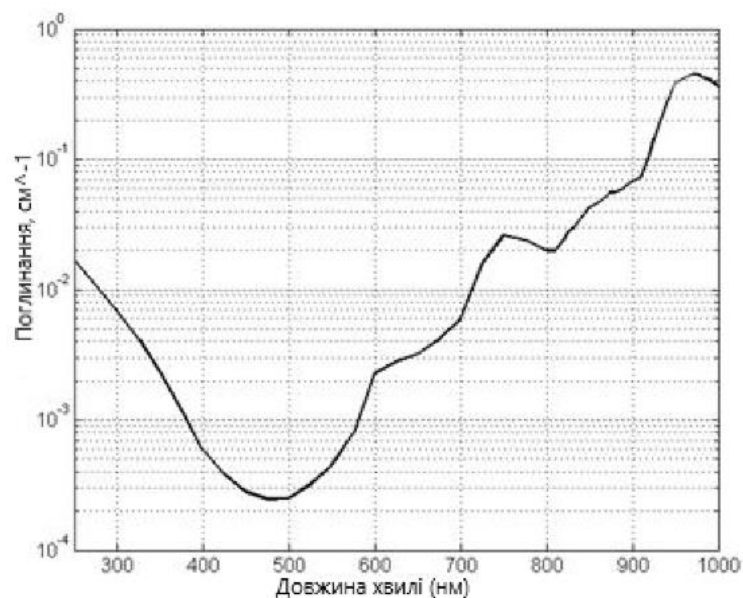


Рис. 2.2. Залежність коефіцієнта поглинання водою від довжини хвилі.

Щодо металів, то на рис. 2.3. зазначений графік залежності коефіцієнта відбиття від деяких полірованих металічних поверхонь.

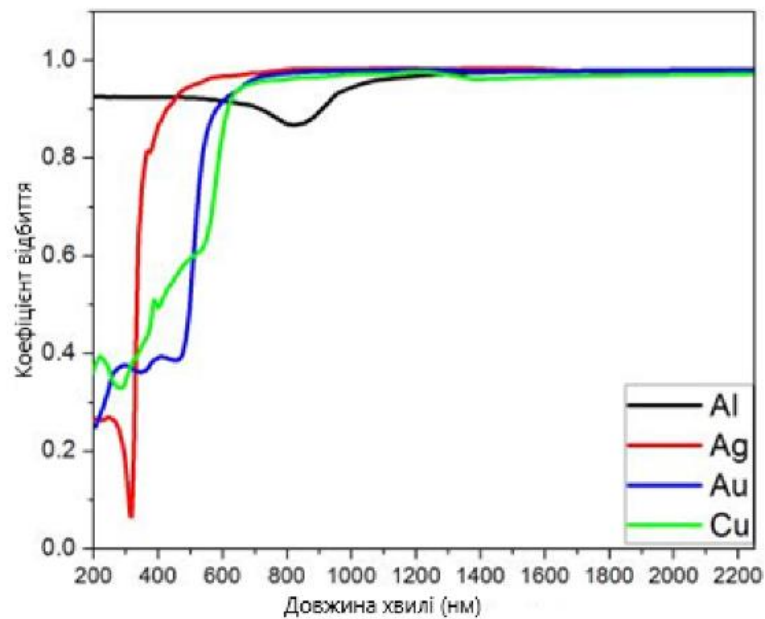


Рис. 2.3. Графік залежності коефіцієнта відбиття від різних полірованих металічних поверхонь

Одразу видно, що навіть на ближньому ІЧ-діапазоні коефіцієнт відбиття сягає 0.9-0.96, тобто майже повне відбиття лазерного випромінювання, а отже – більше енергії повернеться на приймачі системи. За графіком (рис. 2.4.) видно, що коефіцієнти відбиття (КВ) ІЧ-випромінювання (діапазону 0.74-1мкм) від ґрунту, сухої та зеленої вологої трави відрізняються, а саме: КВ від ґрунту складає 0.29-0.33; сухої трави - 0.33-0.38; зеленої вологої трави – 0.385-0.395. Знову ж таки, коефіцієнт відбиття від води мінімальна.



Рис. 2.4. Коефіцієнти відбиття ІЧ-випромінювання від різних земних поверхонь [10].

За графіком (Рис. 2.5.) також спостерігається поступове збільшення КВ зі збільшенням довжини хвилі, окрім солоної води, де спостерігається більш складна залежність .

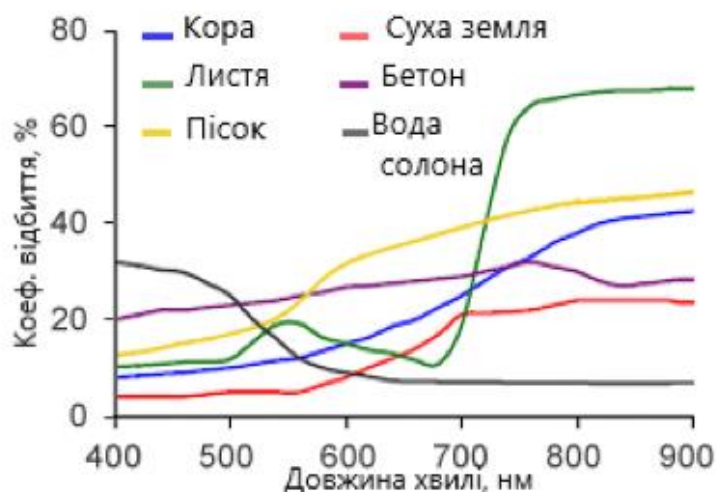


Рис. 2.5. Коефіцієнти відбиття ІЧ-випромінювання від різних поверхонь [10].

- Ультрафіолетове випромінювання. Довжина хвилі ультрафіолетового випромінювання становить 400 - 100 нм і має слабкі біологічні дії.

Область УФ-випромінювання умовно ділиться на:

Ближню - $\lambda = 400 - 200$ нм;

Далеку - $\lambda = 380 - 200$ нм;

Вакуумну - $\lambda = 200 - 10$ нм.

Найхарактернішою рисою є збільшення особливого коефіцієнта поглинання, який призводить до зменшення прозорості багатьох тіл, які мають прозорість у видимій області. Для підтвердження цього потрібно повернутися до попередніх графіків (Рис. 2.2.-2.5.). Так при переході з видимого випромінювання в УФ, коефіцієнт поглинання водою починає зростати так само як в при переході від видимого спектру до ІЧ, що цікаво. Також було доведено, що звичайне скло непрозоре для УФ при довжині хвилі $\lambda = 320$ нм, що є важливою перевагою перед іншими [16].

Звідси з графіків видно, що коефіцієнти відбиття починають спадати для всіх типів поверхонь. Отже менше відбитого випромінювання повертається назад на приймачі, що дозволить зробити деякі висновки.

Однак з іншого боку що чим коротше довжина хвилі, тим менше залишається варіантів перешкод, які вона може в принципі обійти, і тому приймається, що її дифракція гірша. Тому теоретично за допомогою УФ-випромінювання можна просканувати менш дрібні об'єкти та деталі. Навіть при наявності того факту, що менше відбитого сигналу повертається на приймачі, можливість просканувати ці дрібні деталі має право на існування.

Останнім дуже важливим фактором для УФ - випромінювання є досить активний вплив на деякі органічні та неорганічні речовини. Деякі мінерали

такі як гіпс та кам'яне вугілля під дією ультрафіолету починають світитися, створюючи люмінесценцію. Такі матеріали краще ідентифікувати по їх спектральних особливостях.

- Видиме випромінювання. Електромагнітні хвилі, що сприймаються людським оком [7]. Зазвичай в якості короткохвильового кордону приймають ділянку 380-400 нм, а в якості довгохвильової - 760-780 нм.

Згідно рисунку 2.4. графік залежності коефіцієнта поглинання водою від довжини хвилі має точку мінімуму при довжині хвилі 480 нм., що як раз відповідає блакитно-зеленому кольору води. При цих діапазонів довжин хвиль спостерігається найбільше значення КВ від води, така поведінка графіку є досить важливою особливістю взаємодії води з лазерним випромінюванням, що значно допоможе при моніторингу. КВ для інших поверхонь мають усереднені значення та можна помітити стрибок графіків з області 550 нм, що відповідають зеленому кольору.

Для остаточного порівняння, на табл. 2.1. представлена таблиця, в якій наведені коефіцієнти відбиття лазерного випромінювання при різних спектральних областях для конкретних поверхонь, що найчастіше зустрічаються в природі[8].

Таблиця 2.1. Коефіцієнти відбиття лазерного випромінювання для різних типів поверхні в залежності від спектральної області.

Тип поверхні	Коефіцієнт відбиття		
	УФ-діапазон (0.35-0.4 мкм)	Видимий діапазон (0.6-0.7 мкм)	ІЧ-діапазон (0.9-1 мкм)
Вода (прісна)	7	10-12	3-4
Ґрунт	6-7	20-24	32-36
Трава суха	9-10	11-15	37-41
Трава волога	4-5	5-7	38-40
Пісок	14-16	35-40	44-47
Кора дерева	9-10	15-20	37-42
Цемент	18-20	23-26	32-34
Листя	10-11	16-12	62-65
Алюміній	91-92	82-85	92-95
Мідь	36-37	92-94	94-95
Срібло	30-80	91-92	94-95

Висновки

Згідно дослідження можна зробити висновок, що кожна поверхня має свої особливості при її взаємодії з лазерним випромінюванням в різних спектральних областях. Наприклад:

- Прісна вода має найбільший КВ при видимому діапазоні, лише у води є така ознака серед інших представлених матеріалів;
- Рослинність (трава, листя) має досить пологий приріст КВ в діапазоні 0.35-0.7 мкм зі стрімким зростанням коефіцієнта в ІЧ-діапазоні, що також є особливістю перед іншими поверхнями;
- Коефіцієнт відбиття для цементу та кори дерева майже рівномірно зростає зі збільшенням довжини хвилі;
- КВ для алюмінію майже не змінюється і має дуже високий показник;
- Більшість металів має відносно низький КВ в УФ-області, набагато високі показники в інфрачервоному та видимому діапазонах;

Отже кожний тип поверхні має свої відмінні особливості перед іншими поверхнями, що визначаються КВ, а отже – різними за параметрами сигналами, що надійдуть після фотоприймачів.

Тому методика щодо ідентифікації типу поверхні може базуватися саме на порівнянні таких параметрів як коефіцієнт відбиття, яскравості, що були отримані під час експлуатації з еталонними значенням цих параметрів.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

3.1 Розробка структурної схеми системи моніторингу

Аналіз сучасних аналогів систем сканування на основі лідарів показав, що їх функціональні можливості не можуть повністю забезпечити відтворення геометрії всіх потенційно небезпечних об'єктів, що знаходяться навколо НБТ. Більше того далеко не всі об'єкти можливо ідентифікувати, наприклад відрізнити тверду стіну та натягнуту плівку, які мають однакову геометрію або тверду бетонну підлогу з піском, трясовиною та ін.

На рисунку 3.1. представлена структурна схема системи сканування земної поверхні для наземного безпілотного апарату.

Також структурна схема наведена на кресленні МРП.171.081.006. Е1.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

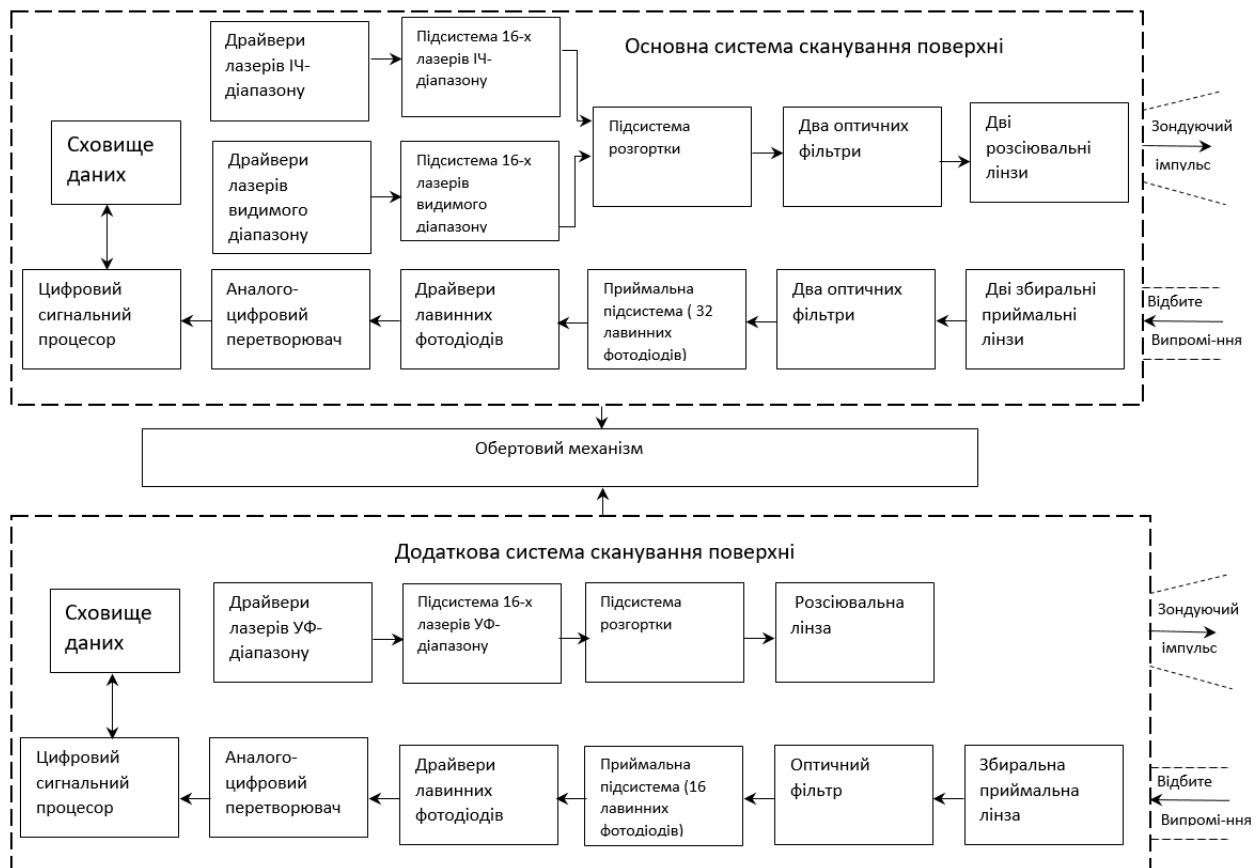


Рис. 3.1. Структурна схема системи сканування земної поверхні для наземного безпілотної апарату

Дана схема складається з трьох структурних блоків: основна система сканування земної поверхні, додаткова система сканування земної поверхні та обертовий механізм. Всі блоки можуть бути встановлені на наземному безпілотному транспорті, прикладом якого є розроблений раніше апарат в роботі [4], структурна схема якої на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Структурна схема наземного безпілотного транспорту

3.1.1. Основний блок системи сканування поверхні

Основний блок системи знаходиться в верхній частині всієї системи сканування. Він складається з 16-х лазерних випромінювачів, що працюють в інфрачервоному та видимому діапазоні спектра. Усі лазери встановлені на друкованих платах з розміщенням 8 на 2 з деяким відхиленням одного ряду від іншого для забезпечення компактності та, в цей же час, збільшені кутової роздільної здатності за рахунок зменшення відстані між лазерними пучками.

Також ці лазери забезпечують основне сканування земної поверхні з визначенням типу поверхні. Надалі буде описано методику їх роботи та особливості цих лазерів.

Паралельно встановлена така сама система, яка містить 16 лазерів видимого діапазону, що встановлені в тому ж порядку, що і лазери в ІЧ-діапазоні. Разом з лазерами в системі встановлюються драйвери лазерів, що відповідають за стабільність їх роботи.

Ці лазери також беруть участь у скануванні земної поверхні з визначенням типу поверхні. Надалі буде описано методику їх роботи та особливості цих лазерів.

Підсистема розгортки являє собою хитне дзеркало і є спільною для двох типів лазерів. Дзеркало встановлене під кутом 45° до оптичної осі випромінювання усіх 32 лазерів. Це забезпечить відхилення лазерних

пучків на 90° , які надійдуть до оптичних фільтрів та лінз. Дзеркало є хитним за рахунок сервоприводу. Кутовий діапазон хитання дзеркала визначений таким чином, щоб забезпечити якомога високу кучність лазерних пучків в невеликій області. Це дозволить збільшити вертикальну кутову роздільну здатність, а отже – покращити якість відтвореної лідаром об’єктів.

Два оптичних фільтра, необхідний для видалення непотрібних спектрів випромінювання лазерів інфрачервоного та видимого діапазону. Розсіювальні лінзи для кожного випромінювання, що являють собою двоввігнуті лінзи, перетворюють паралельні промені в розсіяні тим самим збільшуючи вертикальне поле зору лідару.

Описані компоненти є системою формування оптичних сигналів зонduючих лазерних імпульсів. З іншого боку встановлена підсистема прийому відбитих від об’єктів зонduючих лазерних імпульсів.

Збиральні приймальні лінзи, що являють собою двоопуклі лінзи збирають відбиті лазерні пучки у паралельні пучки. Так само, оптичні фільтри пропускають когерентні пучки лише з довжиною хвилі, що відповідають визначеному спектральному діапазону довжин хвилі пучків на виході лазерів.

Приймальна оптична підсистема являє собою 32 лавинних фотодіода, які працюють у діапазоні довжин хвиль, що і лазерні випромінювачі.

Після перетворення оптичних сигналів в електричні аналогові вони надходять до детектора та АЦП перетворюючись на цифрові імпульси.

Цифровий сигнальний процесор оброблює ці імпульси, селекує та зберігає їх у сховищі даних для подальшої роботи з ними.

3.1.2. Додатковий блок системи сканування поверхні

Додатковий блок системи сканування земної поверхні знаходиться нижче та має схожу структуру, що і основна за деякими відмінностями.

У якості випромінювачів використовуються 16 лазерів, що працюють в УФ-діапазоні, що встановлені так само в системі схожої архітектури. Використовуються лише по одному оптичному фільтру та по одній оптичній лінзі для системи формування оптичних сигналів та прийому лазерних імпульсів. Лавинні фотодіоди працюють в діапазоні УФ-випромінювання.

Інші компоненти: АЦП, сигнальний процесор та сховище даних також використовуються в цьому блоці. Вони працюють з електричними сигналами, що мають відмінні складові ніж сигнали в основній системі сканування.

В наступних розділах будуть детально описані усі основні компоненти системи, їх структура, принцип роботи, параметри, особливості та аргументації щодо їх використання саме в цьому проекті.

3.2. Порівняння основних типів лазерів

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки в проекті використовуються лазери необхідно розглянути всі основні типи лазерів, з оглядом переваг та недоліків кожного з типів. Лазер або оптичний квантовий генератор - пристрій, що генерує когерентні і монохроматичні електромагнітні хвилі за рахунок вимушеного випускання атомами (іонами, молекулами) або в р-п переході активного середовища.

- Твердотільний лазер - це лазер, в якому активним середовищем є активовані діелектричні кристали і скло або діелектричні кристали з власними точковими дефектами. У якості активаторів кристалів і скла зазвичай служать іони рідкісноземельних елементів або іони групи заліза. Власні точкові дефекти в кристалах виникають під впливом іонізуючого випромінювання або шляхом адитивного фарбування. Енергетичні рівні активаторів або власних дефектів використовуються для створення інверсної населеності.

Широко використовуються лазери на кристалі рубіна - оксиду алюмінію (Al_2O_3), в якому близько 0,05% атомів алюмінію заміщені іонами хрому Cr_3^+ , на алюмо-ітрієвому гранаті ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), на склах з домішкою іонів неодиму (Nd_3^+), тербію (Tb_3^+), ітербію (Yb_3^+) і ін. Вимушене випромінювання різних частот дають більше 250 кристалів і близько 20 видів скла [17].

Діапазон довжин хвиль генерації твердотільних лазерів простягається від УФ до середньої ІК-області. Твердотільні лазери працюють в імпульсному, безперервному і квазінеперервному режимах.

Активний елемент цих лазерів зазвичай мають форму кругового циліндра або стрижня прямокутного перерізу. Іноді застосовують і активний елемент більш складних конфігурацій. Найбільшого поширення набула конструкція твердотільних лазерів, в якій циліндричний активний елемент разом з газорозрядної лампою накачування поміщаються в камеру-освітлювач, концентрують випромінювання лампи накачування в активний елемент. За рахунок багатократності відзеркалення випромінювання накачування від внутрішньої поверхні камери-освітлювача досягається більш повне його поглинання в активний елемент. Застосовують освітлювачі, в яких одна лампа накачування працює на кількох активних елементах або, навпаки, один активний елемент накачується кількома або великим числом ламп.

У існуючих твердотільних лазерів потужність генерації в безперервному режимі може досягати 1-3 кВт при питомій енергозйомі $\sim 10 \text{ Вт з } 1 \text{ см}^3$ активного середовища при ККД $\sim 3\%$. Середня потужність 10^3 Вт при частоті повторення імпульсів до 100 Гц реалізується в твердотільних лазерах імпульсно-періодичної дії в режимі вільної генерації при тривалості імпульсу $10^{-3} - 10^{-4} \text{ с}$.

Твердотільні лазери займають унікальне місце в розвитку лазерів. Це прості в обслуговуванні пристрої, здатні генерувати енергію високої потужності.

Для накачування твердотільних лазерів можуть використовуватися світлодіоди, лампи, інші лазери. Твердотільні лазери з діодним накачуванням називаються DPSS - diode-pumped solid-state (Рис. 3.3.).

Переваги твердотільних лазерів:

- Висока питома потужність;
- Висока якість при великій потужності (TEM00);
- Високий ККД (з діодним накачуванням) 20%;
- Велика енергія (до одного кДж / імпульс);
- Широкий діапазон довжин хвиль;
- Широкий діапазон тривалостей імпульсів (від 10^{-2} до 10^{-13} с);
- Можливість генерації ультракоротких імпульсів - рекордне значення становить близько 4 фемтосекунд;
- Сумісність довжин хвиль з оптичним волокном - можливість передавати випромінювання по оптоволокну;
- Можливість внутрішньорезонаторного подвоєння частоти генерації;
- Велика яскравість;



Рис. 3.3. DPSS-лазер SSP-LN-543 [13].

Основними недоліками є велике енергоспоживання, необхідність в зовнішньому водяному охолодженні, чутливість до атмосферної температури.

• Газові лазери.

Різноманітність газових лазерів ґрунтується на явищі посилення світла. Активне середовище таких лазерів є або окремі атоми або молекули, або суміш різних речовин в залежності від функціональності системи. Інверсія населеності, як передумова для посилення через вимушене випромінювання в основному досягається шляхом накачування газу електричним розрядом, але існують газові лазери, в яких використовується накачування хімічними реакціями, пристроями оптичного накачування і раманівськими лазерами. Протягом роботи, газ часто знаходиться в стані плазми, яка містить значні концентрації електричних заряджених частинок.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більшість газових лазерів випромінюють з високою якістю пучка, близьким до дифракційних меж що пов'язано з тим, що газове середовище характеризується малими оптичними спотвореннями, незважаючи на значні градієнти температур. Для їх роботи зазвичай потрібна висока напруга, часто з високою електричною потужністю. Деякі високопотужні газові лазери використовують системи для швидкої циркуляції газу (примусова конвекція, швидка течія).

Існує багато різних видів газових лазерів, що працюють в різних режимах щодо довжини хвилі і потужності випромінювання.



Рис. 3.4. Газовий лазер LASOS LGK 7654-8 He-Ne [13].

Газові лазери можуть бути згруповані відповідно до характеру активної лазерної середовища:

- Нейтральна активна атомна лазерна середа газу включає гелій-неонові лазери і лазери на парах міді.
- Іонні лазери використовують вільні іони; наприклад, гелій-кадмієвий лазер, лазер на іонах аргону і криптону. Як правило, іонні лазери здатні генерувати короткі довжини хвиль, але з помірною ефективністю потужності.
- Молекулярні газові лазери використовують молекули газу. Прикладами є лазер на вуглекислому газі і лазери на окису вуглецю, лазери на азоті і ексимерні лазери.

Багато газових лазерів мають самообмеженні лазерні переходи, де нижня межа має тривалий термін служби. Генерація зупиняється нижче стану, де населеність стає занадто високою. Прикладами таких лазерів можуть стати лазер на азоті і лазер на парах міді.

Переваги газових лазерів:

- Мають високий ступінь когерентності, випромінюють в дуже вузькому діапазоні частот;
- Газові лазери в імпульсному режимі можуть працювати з великою частотою прямування (десятки кілогерц);
- низькі енерговитрати;

Недоліки:

- Великі розміри;
- невисокий ККД.

Волоконні лазери

• Волоконний лазер - лазер, активне середовище і, можливо, резонатор якого є елементами оптичного волокна. При повністю волоконній реалізації такий лазер називається цільноволоконним, при комбінованому використанні волоконних і інших елементів в конструкції лазера він називається волоконно-дискретним або гібридним [9]. Волоконні лазери застосовуються в промисловості для різання металів і маркування продукції, зварюванні і мікрообробки металів, лініях волоконно-оптичного зв'язку[10].

Існує велика різноманітність конструкцій волоконних лазерів, обумовлені специфікою їх застосування. Для їх виготовлення широко застосовуються як резонатори типу Фабрі - Перо, так і кільцеві резонатори. Спеціальними методиками можна створити однополяризаційні лазери, лазери надкоротких імпульсів і інші.

Переваги волоконних лазерів:

- ефективний тепловідвід;
- висока якість вихідного випромінювання;
- висока стабільність і надійність лазера;
- ефективність накачування;
- компактність і малу вагу.
- висока оптична якість випромінювання

Недоліки волоконних лазерів:

- виникнення нелінійних ефектів через високу щільність випромінювання в волокні;
- порівняно невелика вихідна енергія в імпульсі, обумовлена малим обсягом активної речовини;
- волоконні лазери не можуть бути використані в спектральному діапазоні 0,7-1,0 мкм.

• Напівпровідникові лазери

Напівпровідникові лазери (інакше - діодні лазери) - це лазери з підсилюючим середовищем на основі напівпровідників, де генерація відбувається, як правило, за рахунок вимушеного випромінювання фотонів при міжзонних переходах електронів в умовах високої концентрації носіїв в зоні провідності. Формально, напівпровідникові лазери також є твердотільними лазерами, проте їх прийнято виділяти в окрему групу, тому що вони мають інший принцип роботи.

Без накачування більшість електронів знаходиться в валентній зоні. Пучок накачування з фотонами з енергією трохи більше ширини забороненої зони збуджує електрони і переводить їх в більш високоенергетичний стан в зоні провідності, звідки вони швидко релаксують в стан поблизу дна зони провідності. У той же час, дірки, які генеруються в валентній зоні, переміщуються в її верхню частину. Електрони із зони провідності

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рекомбінують з цими дірками, випускаючи фотони з енергією, приблизно рівній ширині забороненої зони. Цей процес може також стимулюватися входять фотонами з відповідною енергією. Кількісний опис ґрунтується на розподілі Фермі-Дірака для електронів в обох зонах.

Більшість напівпровідникових лазерів є лазерними діодами з накачуванням електричним струмом, і з контактом між n-легованими і р-легованими напівпровідниковими матеріалами.

Незважаючи на те, що можна створити напівпровідниковий лазер з практично будь-якою довжиною хвилі в діапазоні від ближнього УФ до ближнього ІК, існує стандартний набір довжин хвиль, лазерів, оптимізований для різних застосувань. На рис 3.5. зображений лазерний діод М9-А64-0300 [29].



Рис. 3.5. Напівпровідниковий лазерний діод М9-А64-0300

Переваги напівпровідникових лазерів:

- Напівпровідникові інжекційні лазери можуть працювати в безперервному режимі;
- Відрізняються високим (близьким до 100%) ККД при перетворенні електричної енергії в когерентне випромінювання;
- Також відрізняються малою інертністю;
- Простота конструкції та компактності;
- Великим різноманіттям ;

Більше того напівпровідникові лазери простіше у використанні і дешевше DPSS. Лазерні діоди продаються у вигляді закінчених дискретних елементів, які вимагають тільки електроживлення та фокусування, в той час як твердотільний лазер містить багато додаткових, прецизійних деталей, чутливих до ударів і вібрацій. У разі, якщо висока якість променя не потрібно, багатомодові лазерні діоди видають велику потужність при тих же (або менших) габаритах і електроживленні. Крім того, лазерні діоди можуть працювати при більшому діапазоні температур і витримують більш високочастотний режим модуляції.

Недоліками напівпровідникових лазерів є:

- відносно невисока спрямованість випромінювання;
- досить важко забезпечити високу монохроматичність випромінювання.

Проаналізувавши усі основні типи лазерів, було прийнято рішення використати для системи моніторингу напівпровідникові лазерні діоди для одразу трьох спектральних діапазонів. Лазерні діоди мають високий ККД, можливість працювати в безперервному режимі, компактність, великий діапазон високих температур та стійкість при вібраціях та ударах – це є дуже важливими перевагами для використання лазерних діодів для НБТ.

3.2.1. Лазерні діоди для ІЧ-діапазону

В основній системі сканування поверхні використовуються 16 лазерних діода ІЧ-діапазону. Важливим завданням є вибір оптимальної для даного проекту таких параметрів: робоча довжина хвилі та вихідна потужність.

В сучасних лідачах використовують дві основні довжини хвилі – 905 та 1550 нм.

Працюючи на 905 нм, всі датчики функціонують на рівні найбезпечніших типів лазерів (клас І). Будь-який єдиний лазерний промінь від датчика, який може потрапити в око, контактував би лише на частку секунди із середньою потужністю, меншою, ніж лазери інших класів. Крім того, оскільки кожен лазер випромінює під різним кутом, кілька лазерів, що вражають око одночасно, не завдадуть шкоди, оскільки освітлюються окремі ділянки сітківки. Поєднання малої потужності та швидкого обертання головки підтримує безпеку очей та інших чутливих елементів.

Системи 1550 нм використовують довжину хвилі, що дозволяє працювати на більших потужностях порівняно з 905 нм. Однак, за певних умов, довжина хвилі 1550 нм світла все ще може спричинити пошкодження рогівки та потенційне пошкодження очної лінзи.

Іншим фактором оцінки довжини хвилі для лідача є поглинання водою. Це важливе питання для наземного безпілотного апарату, враховуючи несприятливі погодні умови, з якими можуть зіткнутися НБТ.

В науковій статті [11], спочатку було зазначено, що хвилі 1550 нм мають набагато більше водопоглинання - на два порядки вище. У дослідженні встановлено, що системи 905 нм є набагато більш стійким до погодних умов. У більшості реалістичних параметрів, втрата лазерного світла на 905 нм менша, оскільки поглинання води сильніше на 1550 нм, ніж при 905 нм.

Для того, щоб компенсувати цю деградацію, 1550 нм системи змушують випромінювати більше лазерного світла для досягнення продуктивності, порівнянної з 905 нм. В результаті системи 1550 нм зазвичай споживають більше електроенергії. Це може створити також потребу в використанні більшого простору для розміщення усіх основних компонентів на безпілотний наземний апарат. Більше того, високе споживання електроенергії іноді може призвести до надмірного вироблення тепла, що

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимагає активних систем охолодження, що збільшує вартість та складність. Також виникає складність юстування лазерних діодів з приймальними лавинними фотодіодами, адже далеко не всі фотодіоди можуть працювати в такому діапазоні.

Оптимальною вихідною потужністю для лазерів є 300мВт, така потужність достатня аби ефективно просканувати об'єкти на відстані до 180 м при цьому не використавши значного обсягу енергії.

Тому для цього проекту для ІЧ-діапазону буде використовуватися лазерний діод GaAlAs з довжиною хвилі 905 нм та потужністю 300мВт.

3.2.2. Лазерні діоди для видимого діапазону

Другий тип лазеру в основній системі сканування поверхні, це 16 лазерних діодів видимого діапазону.

Для видимого діапазону буде використовуватися середні значення між ближнім УФ та ближнім ІЧ. Оптимальним варіантом є використати довжину хвилі 650 нм з тією ж потужністю 300мВт. Приклад такого лазеру зображено на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Лазерний діод TO5, 600нм,300мВт

3.2.3. Лазерні діоди для УФ-діапазону

В додатковій системі сканування поверхні використовуються 16 лазерів УФ-діапазону. Вибір потрібних лазерів цього діапазону має найбільшу складність, адже значну частину лазерних діодів виготовляються для видимого та ІЧ-діапазону. Проаналізувавши всі варіанти, було прийнято використати лазерний діод з GaN, що випромінює на довжині хвилі 375нм с вихідною потужністю 200мВт. На рис 3.7. зображений приклад такого пристрою.



Рис. 3.7. Лазерний діод з GaN, 375нм, 200мВт

З меншою довжиною хвилі лазерні діоди майже не виготовляють, а використовувати інші типи лазерів недоречно за рахунок великих габаритів, потужностей та вартості. Більше того важно знайти необхідний для даної довжини хвилі приймач.

3.3. Фотоприймач лазерного випромінювання.

Оскільки в проекті використовуються лазерні діоди, доречно використовувати лавинні фотодіоди ніж інші фотоприймачі.

Лавинні фотодіоди - високочутливі напівпровідникові прилади, що перетворюють світло в електричний сигнал за рахунок фотоефекту. Їх можна розглядати в якості фотоприймачів, що забезпечують внутрішнє посилення за допомогою ефекту лавинного множення.

З функціональної точки зору вони є твердотільними аналогами фотопомножувачів.

Якщо до фотодіоду докласти досить високу зворотню напругу, то напруженість поля в області переходу виявиться настільки високою, що почнуть розвиватися процеси ударної іонізації атомів кристалічної решітки прискореними електронами (лавинні фотодіоди сконструйовані таким чином, що критичне напруження досягається в них вже при досить низьких значеннях зовнішнього напруги зміщення). Це призводить до значного зростання зворотного струму при стабільному світловому потоці. Як темнові, так і фотоелектрони набувають в сильному полі енергію, більшу, ніж вони втрачають при зіткненнях з атомами кристалічної решітки. Якщо отримана електронами енергія перевищує енергію іонізації, то вони можуть створити нові електронно-діркові пари. При досить протяжній області сильного поля електрони і дірки, що виникли також можуть прискоритися до енергії іонізації і згенерувати нові пари, тобто буде спостерігатися лавиноподібне наростання числа носіїв заряду (і, відповідно, лавиноподібне зростання зворотного струму фотодіода).

Лавинні фотодіоди в певному діапазоні зворотних напруг мають дуже круту характеристику. Це означає, що навіть зовсім незначні коливання освітленості можуть викликати відчутні коливання зворотного струму через

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діод. Тому такі прилади використовуються там, де потрібна підвищена чутливість. Крім того, лавинні фотодіоди мають найменшу інерційність в порівнянні з іншими видами фотодіодів. До їх же недоліків слід віднести необхідність застосування високостабільних джерел напруги зсуву, небезпека перегріву при великих значеннях струму через діод, набагато вужчий в порівнянні зі звичайними діодами динамічний діапазон.

Головною відмінністю лавинного фотодіода (ЛФД) від звичайного фотодіода є внутрішнє посилення сигналу, що базується на лавинному електронному множенні сигналу. Якщо структура шарів у звичайного фотодіода має вигляд $p + -i-n +$, то у ЛФД додається p -шар ($p + -i-p-n +$). При чому профіль розподілу легуючих домішок вибирається так, щоб найбільший опір, а отже, і найбільшу напруженість електричного поля мав p -шар. При впливі світла на i -шар утворюються електронно-діркові пари. Завдяки невеликому полю, відбувається спрямований рух носіїв до відповідних полюсів. При попаданні вільних електронів з i -шару в p -шар їх прискорення стає більш відчутним через високе електричне поле в p -шарі. Прискорюючись в зоні провідності p -шару, такі електрони накопичують енергію достатню, щоб вибити інші електрони з валентної зони в зону провідності. Цей процес носить назву лавинного підсилення або множення первинного фотоструму. Коефіцієнт множення становить кілька десятків, тому струмовий чутливість ЛФД значно вище струмової чутливості $p-i-n$ фотодіодів.

3.3.1. Лавинні фотодіоди для видимого та ІЧ-діапазону

Лавинні фотодіоди поділяються на певні серії, що визначаються матеріалом та робочим діапазоном.

Наприклад, серія НЗ включає в себе лавинний фотодіод на основі кремнію або $InGaAs$ з оптимізованим мал шумливим передпідсилювачем для використання в лазерних далекомірах, лідарах, медичних і аналітичних застосуваннях. Розміщений у модифікований 5-контактний корпус ТО-46 передпідсилювач серії НЗ дозволяє отримати смугу пропускання до 1 ГГц. Вища смуга пропускання може бути досягнута шляхом подальшого зниження значення резистора зворотного зв'язку.

Разом з підсилювачами серії НЗ можуть використовуватися такі кремнієві лавинні фотодіоди SAR500, SAR1500 і SAT800, що працюють в спектральному діапазоні від 400 нм до 1100 нм. Такі фотодіоди підходять для їх використання в основній системі сканування поверхні де використовуються лазери з довжинами хвиль 905 та 650 нм. На рис. 3.8. зображені фотодіоди серії НЗ серії саме такої серії.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.8. Лавинні фотодіоди SAR500

Використовуються 32 ЛФД, що встановлені на друкованих платах.

Основні параметри:

- Смуга пропускання до 1 ГГц;
- Спектральний діапазон 400-1100 нм;
- Герметичний корпус ТО-46;
- Робоча напруга +/- 5 В.

3.3.2. Лавинні фотодіоди для УФ-діапазону

В додатковій системі сканування поверхні використовуються 16 ЛФД УФ-діапазону.

Для УФ-діапазону використовуються ЛФД з нітриду галію (GaN), адже попередні приклади з Si та InGaAs не здатні працювати на таких спектральних діапазонах.

На рисунку 3.9. представлений ЛФД, що працює в діапазоні 350-550 нм

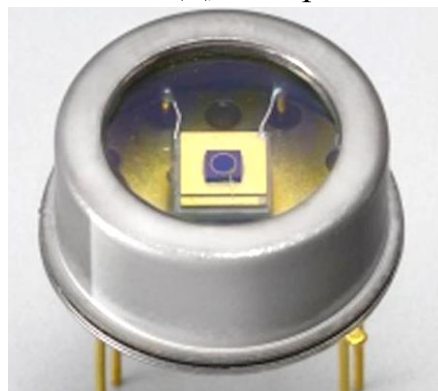


Рис. 3.9. Лавинний фотодіод УФ-діапазону

Параметри даної моделі:

- Спектральний діапазон 350-550 нм;
- ККД> 80%;
- Оптимальне посилення: 50-60;

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Напруга живлення: ± 5 В;
- Робоча температура: $-40 - 100$ °С.

3.4. Драйвери лазерних діодів

На загальному рівні існує кілька класів або типів лазерних драйверів. Це: постійний струм (DC), імпульсні, драйвери низької потужності та великої потужності. Постійний струм - це постійний рівень струму у часі, наприклад, 30 мА, теоретично назавжди, якщо це потрібно. Імпульсні драйвери лазерного діода є цікавим варіантом того, що вихідний струм є функцією часу. Коли джерело струму увімкнено - вихідний струм високий, поділений на загальний час імпульсу (час увімкнення та вимкнення).

На рис. 3.10. зображена електрична схема драйвера для лазерних діодів [16].

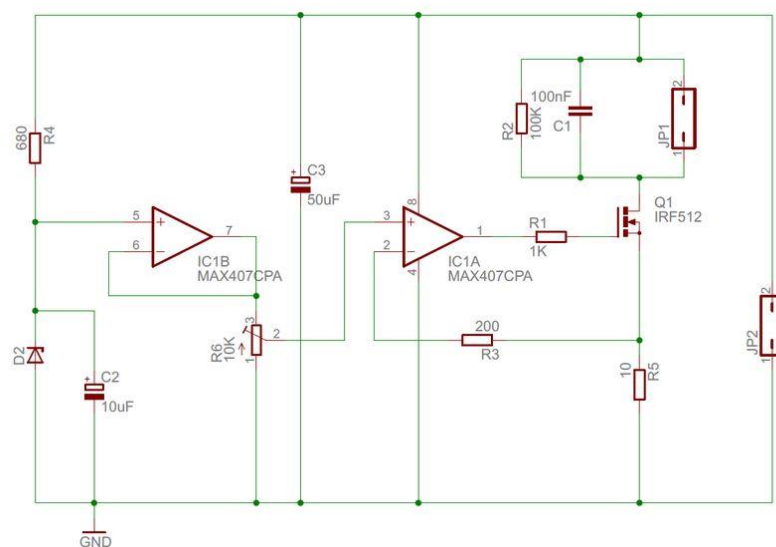


Рис. 3.10. Електрична схема драйвера для лазерних діодів

3.5. Драйвери лавинних фотодіодів

Якщо драйвер лазерного діода був потрібен для забезпечення стабільності роботи лазера, то для ЛФД драйвер необхідний для забезпечення високого посилення.

Для отримання посилення для лавинного фотодіода зазвичай потрібна висока напруга зворотного зміщення. Операційний підсилювач може працювати на джерелах живлення від 5В. На рис. 3.11. зображена електрична схема драйвера для лавинного фотодіода.

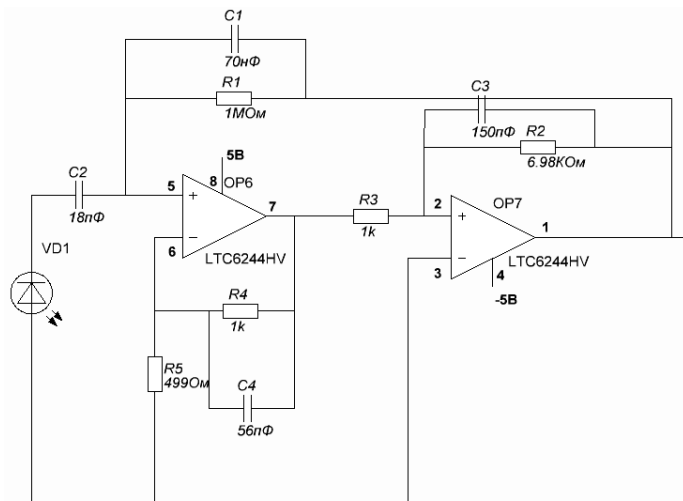


Рис. 3.11. Електрична схема драйвера для лавинного фотодіода.

Драйвери є індивідуальні для кожного лазерного діода та лавинного фотодіода. Тому в проекті кожен лазер та фотодіод разом з драйверами будуть розміщені на індивідуальних друкованих платах. Тому загалом буде використовуватися 96 таких плат (64 в основній системі сканування поверхні та 32 і в додатковій), що, звичайно, значно позначиться на компактності, вартості та складності. Однак це забезпечить стабільність роботи лазерних діодів та ефективне підсилення фотодіодів, ці аспекти є вирішальними.

3.6. Аналогово-цифровий перетворювач

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) це пристрої, які приймають вхідні аналогові сигнали та генерують відповідні до них цифрові сигнали, які придатні для обробки сигнальним мікропроцесором, що використовується в проекті. Аналогові сигнали надходять до АЦП з лавинних фотодіодів.

Вибір АЦП є дуже важливим процесом, перше на що потрібно звернути увагу це той факт, що відбувається дискретизація сигналів, що являють собою набір спектрів, отримані в результаті сканування різних поверхонь. Такі сигнали мають багато частотних гармонік, що викликані нерівномірністю та різноманітністю поверхонь, що скануються; різкі стрибки амплітуди, що викликані різкою зміною дальності сканування при появі на шляху лазерних пучків нового об'єкту чи навпаки - кінця об'єкту, що на даний момент сканувався. Також стрибок амплітуди викликаний різкою зміною типу поверхні, наприклад перехід з сталевого кузову до скла автомобіля. Також за рахунок швидкого обертання головки сканера відповідно відбувається стрімкі зміни параметрів сигналу. Тому АЦП повинен працювати зі широкосмуговими неперіодичними сигналами, що досить стрімко змінюються у часі. Отже можна вивести такі основні вимоги для АЦП де перші за номером вимоги є пріоритетними:

1. Висока точність, особливо якщо це стосується стрибкоподібних ділянок сигналу;

2. Мінімальні помилки квантування;
3. Швидкодія;
4. Висока роздільна здатність АЦП;
5. Стійкість до нелінійностей;
6. Низьке енергоспоживання;
7. Компактність;

Основні типи АЦП:

- Паралельні АЦП прямого перетворення, повністю паралельні АЦП, містять по одному компаратору на кожен дискретний рівень вхідного сигналу. У будь-який момент часу тільки компаратори, відповідні рівням нижче рівня вхідного сигналу, видають на своєму виході сигнал перевищення [12].

- АЦП послідовного наближення або АЦП з порозрядним урівноваженням містить компаратор, допоміжний ЦАП і регістр послідовного наближення. АЦП перетворює аналоговий сигнал в цифровий за N кроків, де N - розрядність АЦП. АЦП цього типу володіють одночасно високою швидкістю і хорошою роздільною здатністю та мале енергоспоживання. Однак при відсутності пристрою зберігання вибірки похибка буде значно більше.

- АЦП диференціального кодування (англ. Delta-encoded ADC) містять реверсивний лічильник, код з якого надходить на допоміжний ЦАП. АЦП диференціального кодування зазвичай є хорошим вибором для оцифровки сигналів реального світу, так як більшість сигналів у фізичних системах не схильні до стрибкоподібних змін. У деяких АЦП застосовується комбінований підхід: диференціальне кодування і послідовне наближення; це особливо добре працює в випадках, коли відомо, що високочастотні компоненти в сигналі відносно невеликі.

- Дельта-сігма АЦП складається з двох частин: модулятор і цифровий ФНЧ. Основною перевагою сігма-дельта АЦП є висока точність, обумовлена вкрай низьким рівнем власного шуму, низькими рівнями нелінійності. Однак для досягнення високої точності потрібно, щоб частота зрізу цифрового фільтра була якомога нижче, у багато разів менше частоти роботи сігма-дельта модулятора. Тому сігма-дельта АЦП мають низьку швидкість перетворення.

Вони можуть використовуватися в аудіотехніці, однак основне застосування знаходять в промисловій автоматичній для перетворення сигналів датчиків, в вимірювальних приладах, і в інших додатках, де потрібна висока точність, але не потрібно високої швидкості.

Отже проаналізувавши основні типи АЦП можна зробити висновок, що кожен тип має свої переваги та недоліки, однак якщо дивитися на список

вимог до АЦП для даного проекту то найоптимальнішим варіантом є сігма-дельта АЦП.

Більшість АЦП мають декілька каналів та здатні працювати одразу з декількома сигналами з фотодіодів. Однак для даного випадку будуть використовуватися одно-канальні АЦП, кожен з яких буде розміщуватися на тій самій друкованій платі, де розміщуються лавинний фотодіод та підсилювач

На рис. 3.12. представлений приклад такого АЦП.



Рис. 3.12. АЦП LTC2401CMS

Основні параметри LTC2401CMS

Кількість бітів: 24

- Частота вибірки (за секунду): 7.5;
- Кількість входів: 1;
- Тип введення: однозакінчений;
- Інтерфейс даних: SPI;
- Кількість А/Ц перетворювачів: 1;
- Архітектура: Сігма-Дельта;
- Напруга живлення, аналоговий: 2,7 В ~ 5,5 В;
- Напруга живлення, цифровий: 2,7 В ~ 5,5 В;
- Робоча температура: 0 ° С ~ 70 ° С.

3.7. Оптичні фільтри

В проекті використовуються 6 світлофільтрів: в основній системі сканування 2 після лазерів підсистеми розгортки, 2 після збиральних лінз; в додатковій системі сканування 1 фільтр після УФ-лазерів та підсистеми розгортки, 1 фільтр перед лавинними фотодіодами.

Під світлофільтром розуміється шар (зазвичай плоскопаралельний) будь-якого середовища, що володіє виборчим пропусканням світла. Світлофільтри змінюють спектральний склад або енергію падаючої на них світлової хвилі, не змінюючи (або майже не змінюючи) форми її фронту.

Світлофільтри діляться на наступні групи [13] :

- світлофільтри зі скла;
- желатинові світлофільтри;
- світлофільтри з забарвлених пластмас;
- рідкі світлофільтри, газові, поляризаційні та інтерференційні.

Світлофільтри змінюють як яскравість, так і кольорові співвідношення між видимими об'єктами і зменшують хроматичні аберації. Використовуючи ці властивості, світлофільтрами користуються для поліпшення видимості (головним чином контрастності) при несприятливих умовах (серпанок, туман, сліпуче світло, мала контрастність об'єктів). Наприклад, жовті та оранжеві світлофільтри застосовуються при наявності повітряного серпанку, так як вони добре поглинають сині і фіолетові промені. Поглинання синіх променів в ясний сонячний день призводить до збільшення контрастності між світлом і тінню, так як тіні завжди дають більше синіх променів, ніж ділянки, освітлені сонцем. При тумані рекомендується застосовувати помаранчеві або червоні світлофільтри. Селективні фільтри призначаються або для відділення широкої області спектра, або для виділення вузької спектральної області. Фільтри останнього типу називаються вузькосмуговими, іноді їх умовно називають монохроматичними. Саме вузькосмугові фільтри використовуються в системі.

- Так для ІЧ- випромінювання використовується вузькосмуговий фільтр або лазерний лінійний смуговий фільтр, що пропускає спектральний діапазон 895-915 нм з деяким допуском. Прикладом такого фільтру є FL905-10, він зображений на рис. 2.18. Цей фільтр буде використовуватися в проекті лише з однією відмінністю – в проекті буде використовуватися прямокутна форма.



Рис. 3.13. Лазерний лінійний смуговий фільтр FL905-10

Основні параметри:

- Центральна довжина хвилі: 905 нм;
- Передача піку: 50%;
- Діаметр: 2,54 см;
- Діапазон робочих температур: від -50 ° С до + 80 ° С ;
- Допуск середньої довжини хвилі: $\pm 20\%$ від ПШПН;
- Допуск повної ширини на пів-максимуму (ПШПН): $\pm 20\%$ ПШПН;
- Для видимого діапазону використовується лазерний лінійний смуговий фільтр CFBR10057-6428-10, що пропускає спектральний діапазон 632-652 нм.

Основні параметри:

- Центральна довжина хвилі: 642 нм;
- Передача піку: 50%;
- Діаметр: 2,54 см;
- Діапазон робочих температур: від -50 ° С до + 80 ° С ;
- Допуск середньої довжини хвилі: $\pm 20\%$ від ПШПН;
- Допуск повної ширини на пів-максимуму (ПШПН): $\pm 20\%$ ПШПН;
- Блокування: рентген - 1150 нм, $T = 0,0001\%$ або OD5.
- Для УФ діапазону використовується лазерний лінійний смуговий фільтр CFBR00144-362-12

Основні параметри:

- Центральна довжина хвилі: 362 нм;
- Передача піку: 40%;

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Діаметр: 2,54 см;
- Діапазон робочих температур: від -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$;
- Допуск середньої довжини хвилі: $\pm 20\%$ від ПШПН;
- Допуск повної ширини на пів-максимуму (ПШПН): $\pm 20\%$ ПШПН;

3.8. Оптичні лінзи передавальної і приймальної підсистеми

В основній системі сканування поверхні використовуються 4 лінзи: дві розсіювальні передавальні лінзи, дві збиральні приймальні лінзи. В додатковій системі сканування поверхні використовуються 2 лінзи: одна розсіювальна передавальна лінза, одна збиральна приймальна лінза.

Лінзи передавальної системи являє собою увігнуту оптичну лінзу. Використовується для розсіювання пучків лазерного випромінювання на певний кут (рис. 3.14.).

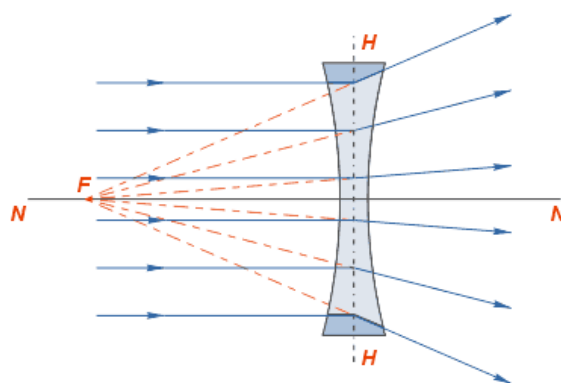


Рис. 3.14. Розсіювальна лінза передавальної підсистеми

Лінзи приймальної системи являють собою опуклу оптичну лінзу (рис. 3.15.).

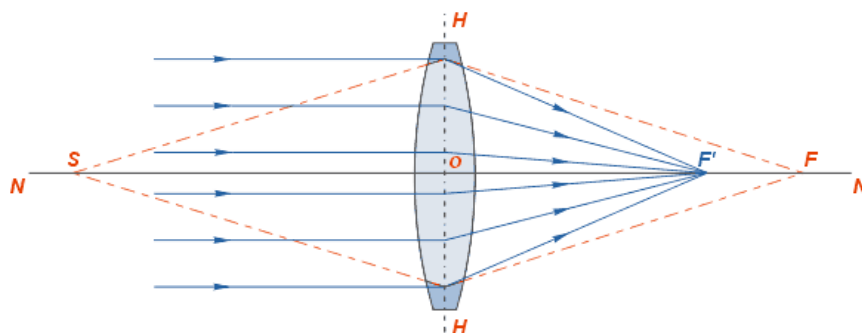


Рис. 3.15. Лінза приймальної системи

Використовуються для фокусування розсіяних пучків лазерного випромінювання на всі 48 лавинних фотодіода, так щоб в ідеалі вся енергія

ЛВ фокусувалася на лавинних фотодіодах. Тобто з великою фокусною відстанню.

Матеріалом оптичних лінз для ІЧ-діапазону буде використовуватися кремній.

Кремній добре пропускає інфрачервоне випромінювання з довжинами хвиль від 0.8 мкм, має наднизьку дисперсію з найбільшим абсолютним значенням коефіцієнта заломлення ($n = 3,42$ при $\lambda = 6$ мкм), і в той же час повністю непрозорий у видимому діапазоні і служить екрануючою поверхнею від видимого і інших типів випромінювання. Тобто оптична лінза також частково слугує як оптичний фільтр тільки з великим спектральним діапазоном. Тому його застосовують при виготовленні лінз для ІК-діапазону.

Для ультрафіолетового та видимого діапазону використовується оптичний кварц (рис. 3.16.) .



Рис. 3.16. Двоопукла лінза з кварцу

Оптичний кварц (Кварцове скло) знаходить широке застосування в оптичних системах (ОС) має ряд корисних оптичних властивостей. Кварцове скло - переплавлений чистий кремнезем з незначними (близько 0,01%) добавками Al_2O_3 , CaO і MgO . Воно відрізняється високою термостійкістю і інертністю до багатьох хімічних реактивів за винятком плавикової і фосфорної кислот.

Прозоре кварцове скло добре пропускає ультрафіолетові і видимі промені світла.

3.9. Цифровий сигнальний процесор

Після перетворення аналогових сигналів в цифрові вони надходять до цифрових сигнальних процесорів (ЦСП) для подальшої обробки і роботи з ними. Основна та додаткова система сканування поверхні має по одному сигнальному мікропроцесору.

Цифровий сигнальний - спеціалізований мікропроцесор, призначений для обробки оцифрованих сигналів зазвичай, в режимі реального часу.

Архітектура сигнальних процесорів, в порівнянні з мікропроцесорами загального застосування, має деякі особливості, пов'язані з прагненням максимально прискорити виконання типових задач цифрової обробки

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналів, таких, як цифрова фільтрація, перетворення Фур'є, пошук сигналів і тому подібне.

Сигнали необхідно обробити так, щоб інформація, яку вони містять, могла бути відображена графічно, проаналізовано або перетворена в корисний сигнал іншого типу. Всі операції виконуються на дуже високій швидкості.

Цифрові сигнальні процесори будуються на основі «Гарвардської архітектури», відмінною особливістю якої є те, що програми і дані зберігаються в різних пристроях пам'яті - пам'яті програм і пам'яті даних. На відміну від архітектури фон Неймана, де процесору для вибірки команди і двох операндів потрібно мінімум три цикли шини, ЦСП може виробляти одночасні звернення як до пам'яті команд, так і до пам'яті даних, і зазначена вище команда може бути отримана за два циклу шини. У реальності, завдяки продуманості системи команд і інших заходів, цей час може бути скорочено до одного циклу. У реальних пристроях пам'ять команд може зберігати не тільки програми, але і дані. У цьому випадку говорять, що ЦСП побудований за модифікованою гарвардською архітектурою.

Пам'ять команд і пам'ять даних зазвичай розташовуються на кристалі ЦСП. У зв'язку з тим, що ця пам'ять має відносно невеликий обсяг, виникає необхідність у використанні зовнішніх (щодо кристала процесора) запам'ятовуючих пристроїв. Для таких пристроїв роздільні шини команд і даних не використовуються, так як це вимагало б значно збільшити кількість зовнішніх виводів кристала, що дорого і непрактично. Тому взаємодія ЦСП з зовнішніми пристроями, що запам'ятовують відбувається по одному комплекту шин без поділу на команди і дані. Слід також зауважити, що звернення до зовнішньої пам'яті завжди займає значно більше часу, ніж до внутрішньої, тому в додатках, критичних до часу виконання, такі звернення необхідно мінімізувати. Зменшення кількості циклів значно покращить швидкодію ЦСП, що є вирішальним фактором при роботі з сигналами в реальному часі, адже для НБТ необхідно оперативно приймати рішення для мінімізації небезпеки та виконання поставлених завдань.

Тому необхідно скласти такі основні вимоги до ЦСП за пріоритетами так само, як і для АЦП.

- 1) Швидкодія. Швидкодія як інтегральну характеристику визначити досить складно, тому швидкість роботи характеризують декількома параметрами, а також часом вирішення деяких реальних завдань:
 - Тактова частота і час командного циклу;
 - Кількість виконуваних операцій за одиницю часу (MIPS)
 - Кількість виконуваних команд за одиницю часу;
 - Кількість виконуваних операцій МАС за одиницю часу;
- 2) Можливість виконувати декілька команд одночасно. Це стосується програмного створення масиву з цифрових даних, що надходять на

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порти з АЦП з одночасним порівнянням цих масивів з постійними еталонними даними про параметри об'єктів, що скануються;

3) Кількість і параметри портів введення-виведення. Так як основна система сканування має 32 канали, то кількість інформаційних портів вводу має сягати мінімум 32. Інакше необхідно використовувати апаратні інтерфейси, що працюють по принципу мультиплексора або ще один ЦСП.

4) Склад і функціональність засобів розробки і підтримки. Є декілька вимог:

-Перелік мов програмування, для яких є компілятори під дану систему;

-Наявність і можливості засобів налагодження готових програм;

-Доступність документації та технічної підтримки;

-Наявність бібліотек стандартних підпрограм і математичних функцій;

-Наявність, доступність і можливості сумісних пристроїв - АЦП, контролери живлення. Це також особливо стосується роботи з програмами та апаратами самого НБТ.

4) Види і обсяг внутрішньої пам'яті. Обсяг внутрішньої оперативної пам'яті показує, скільки даних ЦСП може обробити без звернення до зовнішньої пам'яті, що може характеризувати загальну швидкодію системи, а також можливість працювати «в реальному часі».

5) Розрядність даних;

6) Тип арифметики. ЦСП діляться на процесори, що обробляють дані з фіксованою точкою і обробляють дані з плаваючою точкою. Пристрої з плаваючою точкою зручніше в застосуванні, але вони помітно складніше по пристрою і дорожчі;

7) Адресуємий обсяг пам'яті. Обсяг адресуємої зовнішньої пам'яті характеризується шириною зовнішньої шини адреси.

Існують багато типів архітектур, однак зіставивши основні вимоги до ЦПС з різними архітектурами був обраний суперскалярний процесор (рис 3.17.) .



Рис. 3.17. Суперскалярний процесор

Це процесор, що підтримує так званий паралелізм на рівні інструкцій тобто, процесор, здатний виконувати декілька інструкцій одночасно за

							Арк.
						МРП.171.081.006. ПЗ	64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

рахунок включення до складу його обчислювального ядра кількох однакових функціональних вузлів (таких як АЛУ, FPU, помножувач (integer multiplier), зсувальний пристрій (integer shifter) та інші пристрої) [18]. Планування виконання потоку інструкцій здійснюється динамічно обчислювальним ядром (статично компілятором).

Способи збільшення продуктивності, які можуть використовуватися спільно:

- використання конвеєра
- збільшення кількості функціональних вузлів процесора (суперскалярність)
- збільшення кількості ядер (багатоядерність)
- збільшення кількості процесорів (багатопроекторність)

При використанні конвеєра кількість вузлів залишається незмінним; збільшення продуктивності досягається за рахунок одночасної роботи вузлів, відповідальних за різні стадії обробки інструкцій одного потоку. При використанні суперскалярного процесора, збільшення продуктивності досягається за рахунок одночасної роботи великої кількості однакових вузлів, незалежно від інструкції одного потоку (в тому числі, і більшої кількості конвеєрів). При використанні декількох ядер кожне ядро виконує інструкції окремого потоку, причому кожне з них може бути суперскалярним або конвеєрним. При використанні декількох процесорів кожен процесор може бути багатоядерним.

У суперскалярному процесорі інструкція витягується з потоку інструкцій (що знаходиться в пам'яті), визначається наявність або відсутність залежності інструкції за даними від інших інструкцій, потім інструкція виконується. Одночасно, протягом одного такту, може виконуватися кілька незалежних інструкцій.

Якщо в процесі роботи процесора кілька інструкцій, оброблюваних конвеєром, незалежні, то ядро може виконати їх одночасно. У суперскалярних системах рішення про запуск інструкції на виконання приймає саме ядро процесора, що вимагає багато ресурсів. У більш пізніх системах використовується статипланування, тобто рішення про те, які інструкції виконувати одночасно, приймає компілятор; компілятор знаходить незалежні інструкції і об'єднує їх в одну довгу інструкцію.

Вузол суперскалярного процесора, званий диспетчером інструкцій (англ. Instruction dispatcher, ID), відповідальний:

- за читання інструкцій з пам'яті;
- за прийняття рішень про те, які інструкції можуть бути виконані одночасно;
- за розподіл інструкцій між декількома функціональними вузлами процесора.

Суперскалярний процесор, зазвичай, здатний виконувати більше однієї інструкції за такт.

3.10. Одноплатний комп'ютер на основі суперскалярного процесора

На сьогоднішній день сучасні технології дозволяють об'єднувати такі пристрої як мікроконтролери, модулі пам'яті, модулі без провідникової передачі, годинники у режимі реального часу на одній друкованій платі. Це дає багато переваг.

На відміну від традиційних персональних комп'ютерів форм-фактора «desktop» (стандарти AT, ATX, і т. П.), одноплатні комп'ютери часто не вимагають установки якихось додаткових периферійних плат. Деякі одноплатні системи виготовлені у вигляді компактної плати з процесором і пам'яттю, що підключаються до backplane для розширення можливостей, наприклад, для збільшення кількості доступних роз'ємів.

Найчастіше ці рішення повинні бути захищені або дуже компактні, тому всі компоненти повинні розташовуватися на одній платі.

Така економія з одного боку робить все пристрій більш компактным і набагато дешевшим за рахунок використання системи на кристалі, з іншого боку, розширення можливостей - зміна процесора або пам'яті - ускладнене, так як найчастіше ці компоненти напаяні на плату.

Тому в проекті буде використовуватися одноплатний комп'ютер, що забезпечить одночасну обробку цифрових сигналів з їх зберіганням в модуль пам'яті.

Проаналізувавши сучасні приклади ОК було прийнято рішення використати модель Raspberry Pi 4B (рис. 3.18.).



Рис. 3.18. Модель Raspberry Pi 4B

Модель Raspberry Pi 4B була представлена в 2019 році та є найновішою модифікацією. Габарити серії складає лише 85,6 мм × 56,5 мм, що є великою перевагою. Плата важить 45 грамів.

					МП.171.081.006. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Плата побудована на основі системи на кристалі (SoC) BCM2711 в якій використаний чотирьох ядерний суперскалярний процесор 1.5GHz ARM Cortex-A72 з тактовою частотою 1,5 ГГц, виготовлений за технологічним процесом 28 нм[14].

Цей мікропроцесор має підтримку стандартного ARM GIC (Generic Interrupt Controller), що істотно пришвидшує роботу систем віртуалізації[15].

Цей комп'ютер дозволяє працювати з технологією бездротової локальної мережі Wi-Fi на рівні стандарту 802.11ac, також додана підтримка мережі Bluetooth версії 5.0[14].

Четверта серія має модуль пам'яті: 1ГБ ОЗУ стандарту LPDDR4[14].

Raspberry Pi 4B підтримує технологію живлення через Ethernet (PoE) з встановленням додаткової плати розширення, працює на повну пропускну здатність, та не обмежений 300 Мбіт/с [14].

Замість одного порту HDMI нова серія має два порти micro-HDMI та 40 звичайних інформаційних портів. Здатна виводити сигнал в форматі HDMI 2.0 4K на 60 Гц на один монітор, або 4K на 30 Гц на два монітори, програвати відео в форматі 4K. Це важливо при аналізі сигналів та взагалі при роботі с НБТ.

Плата живиться:

Від 5 В постійного струму через роз'єм USB-C (мінімум 3А) або від 5 В постійного струму через вивід GPIO (мінімум 3А). Також комп'ютер має на 2.5А блок живлення, його можна використовувати, якщо периферійні пристрої USB споживають менше 500 мА.

Робоча температура: 0 - 50 градусів навколишнього середовища.

В основній та додатковій системі сканування використовується по одному комп'ютеру. Комп'ютери постійно взаємодіють між собою через мережу Ethernet або Bluetooth. Перевагою використання двох таких комп'ютерів є те, що при несправності першого комп'ютера, роль на себе візьме другий, однак він вже буде працювати з меншою кількістю каналів. Кожен комп'ютер є рівноправний, тобто працює з половиною каналів кожної системи, всі три спектральні діапазони. Також в кожному комп'ютері записані протоколи LAS та протоколи передачі даних між собою та до оператора.

3.11. Алгоритм роботи системи моніторингу земної поверхні

Вся система, що являє собою головку циліндричної форми після активації починає обертатися поки не досягне максимальної частоти 1200 об/хв або 20ГЦ, утворюючи горизонтальну розгортку. В цей же час всі лазерні випромінювачі (УФ, ІЧ та видимого діапазону) починають випромінювати когерентне монохроматичне випромінювання. Спочатку лазерні пучки потрапляють на хитне дзеркало, утворюючи вертикальну розгортку. Пройшовши через оптичні фільтри та лінзи, лазерні пучки взаємодіють з

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхнями, в залежності від типу поверхні деяка частина випромінювання відбивається, поглинається та проходить через поверхню, заломлюючись. Відбите випромінювання повертається до системи, проходить через збиральну лінзу, оптичні фільтри і потрапляють до лавинних фотодіодів.

Отримані з фотодіодів аналогові сигнали оцифровуються і надходять до одноплатних комп'ютерів. Комп'ютери використовують заздалегідь написаний власний алгоритм аналізу даних, що представляють собою дані відрізка часу, що пройшов сигнал від лазерів до комп'ютера для кожного пучка, протокол LAS. Використання в загальному 48 лазерів підсистеми розгортки та швидку обробку сигналів формують обсяг даних, переданих за секунду, що містить більше мільйона точок. Кожна точка - це вимірювання відстані від системи до об'єктів. Дані з комп'ютера додаткової системи сканування, передається до комп'ютера основної системи сканування через Ethernet та навпаки.

Потім ці дані точок передаються декількома способами з використанням декількох передавачів сигналу (як було розроблено в роботі [4]). Дані надходять до оператора де і формується хмара точок або 3D карта та виводиться на монітор у вигляді кадрів. За рахунок декількох спектральних діапазонів, вдосконаленої системи розгортки, забезпечуються краща роздільна здатність, а отже, і якісність кадрів на моніторі ніж в сучасних аналогів. На рис. 3.19. зображена блок-схема алгоритму роботи системи сканування.

Так як ще одним технічним завданням є визначення типу цих об'єктів за матеріалами, наступний підрозділ буде присвячений цій методиці.

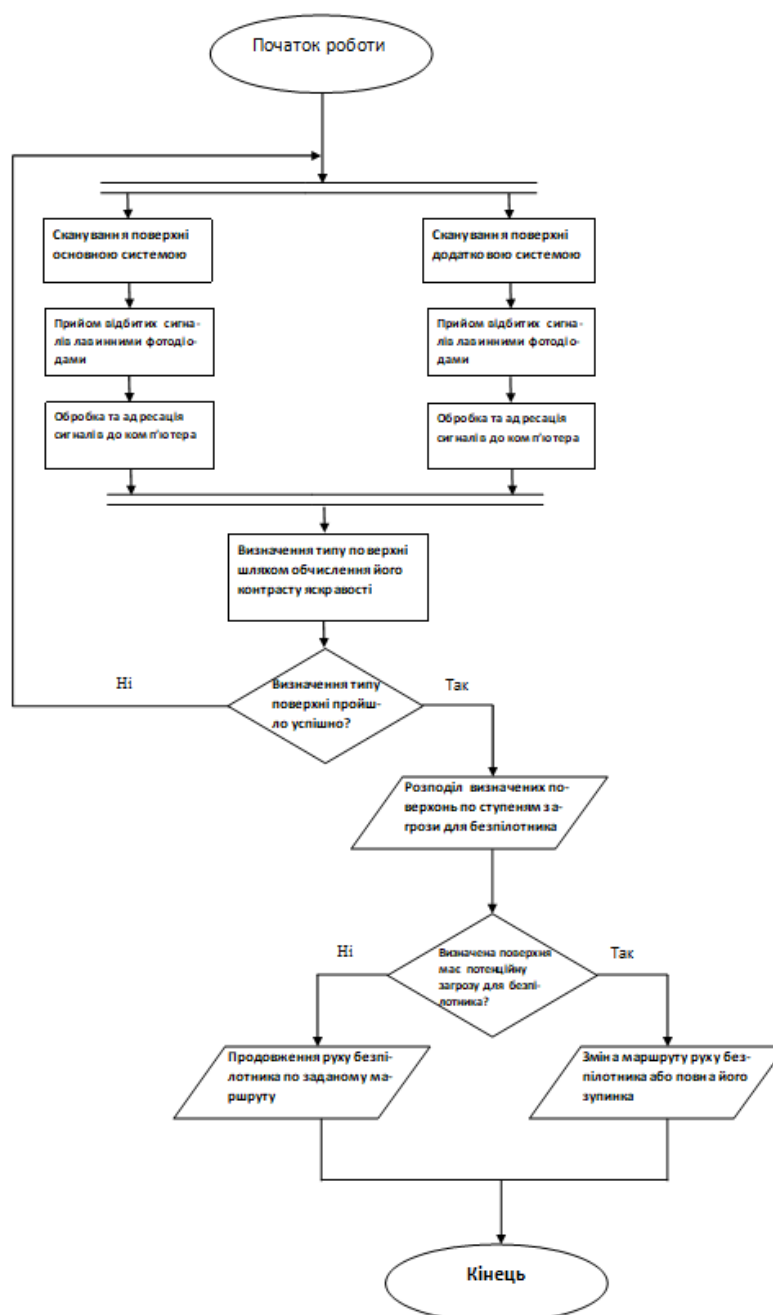


Рис 3.19. Блок-схема алгоритму роботи системи сканування

3.12. Методика визначення типу поверхні

Для визначення типу матеріалу використано установку, структурна схема якої показана на рис. 3.20.

Дана установка і є системою сканування поверхні, що складається з пристроїв, що вже були розглянуті. Тобто для використання цієї методики не потрібно додаткових пристроїв та додаткових конструктивних рішень. Методика застосовується з використанням усіх лазерних випромінювачів видимого ІЧ, та УФ-діапазону 1 і 2 і 3 з частотою 650, 905 та 370 нм відповідно. Лавинні фотодіоди 5,6, з'єднані зі входами АЦП 7, що в свою чергу з'єднані з одноплатними компютерами 8, що виконують функцію

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

порівняння та обробки. Блок 9 являє собою блок пам'яті де зберігаються еталонні дані (ОЗУ комп'ютера).

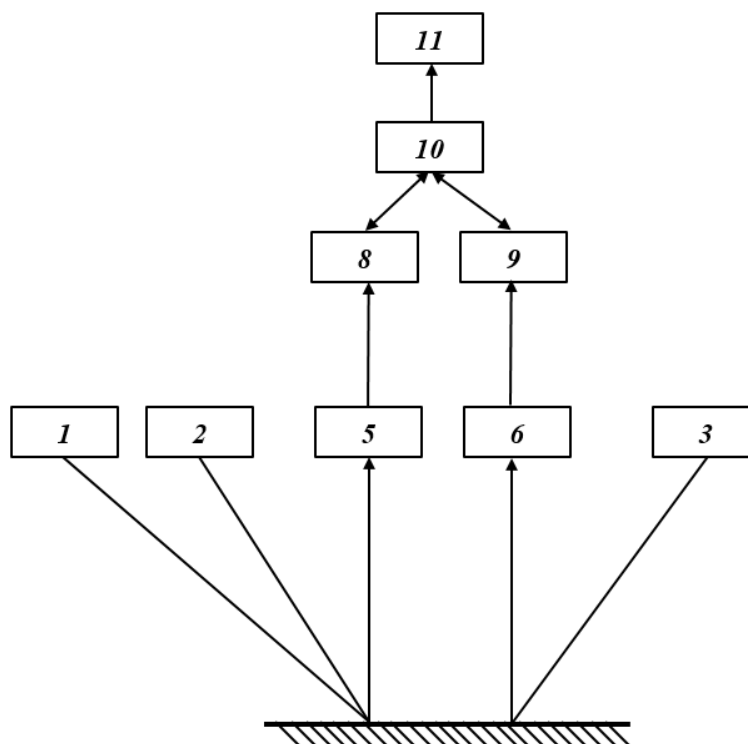


Рис. 3.20. Структурна схема підсистеми визначення поверхні.

Вимірювання коефіцієнта відбиття відбувалося зі застосуванням еталонних матеріалів, що знаходились під ІЧ випромінюванням (905 нм) [19].

Метод вимірювання полягає в визначенні контрасту яскравості в двох спектральних діапазонах досліджуваних поверхонь, і полягає в наступному.

Перед проведенням вимірювання необхідно для початку провести настройку вимірювача.

Ця настройка виконується таким чином: встановлюють 3 лазерних випромінювача з вказаною раніше діапазоном випромінювання та фотоприймачі на одній базовій площині. Розміщують еталонну поверхню з коефіцієнтом відбиття приблизно 0,45 на фіксованій відстані перпендикулярно оптичній осі випромінювання. Ця відстань встановлюється таким чином, щоб отримати максимальну ефективність прийому відбитого випромінювання. Призводять випромінювачі к одному рівню потужності і куту розподілу.

Реєструють вихідні напруги фотодіода $U_{fd}(\lambda_1)$, та $U_{fd}(\lambda_2)$, що відповідають коефіцієнту відбиття від еталонної поверхні при двох довжин хвиль, і розраховують величини опорного рівня. Ці значення заносяться до запам'ятовуючого пристрою.

Після процесу настройки приладу відбувається безпосередньо процес визначення типу поверхні в заданому порядку.

Наземний безпілотний апарат рухається, скануючи поверхню. Одним із головних вимог методики є фіксована відстань. Однак оскільки швидкість сканування набагато більше швидкості руху НБТ, то за час одного циклу сканування, переміщення НБТ майже не відбулося і відстань можна вважати незмінною для кожного окремого циклу. Послідовно вимірюючи фото-відповідь на трьох довжинах хвиль, потім обчислюють контраст яскравості K_L для даної поверхні і порівнюють з опорним рівнем K_{LO} . Маємо три формули контрасту яскравості: для комбінацій довжин хвиль 1 і 2, довжин 2 і 3 та довжин 1 і 3.

Середні контрасти яскравості визначаються наступним чином:

$$K_{L1}(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) = L_{ni}(\Delta\lambda_1) - L_{ni}(\Delta\lambda_2) \quad (3.1.)$$

$$K_{L2}(\Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3) = L_{ni}(\Delta\lambda_2) - L_{ni}(\Delta\lambda_3)$$

$$K_{L3}(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_3) = L_{ni}(\Delta\lambda_1) - L_{ni}(\Delta\lambda_3)$$

Де L_{ni} – середня яскравість i -ї типу поверхні

Яскравість поверхонь при активному зондуванні потоком випромінювання визначається:

$$L_{ni}(\Delta\lambda) = \rho_{\Delta\lambda} \cdot \frac{E_{\Delta\lambda}}{\pi}, \quad (3.2.)$$

де $\rho_{\Delta\lambda}$ – коефіцієнт відбиття поверхні;

$E_{\Delta\lambda}$ - освітленість поверхні, що створюється випромінювачем з яскравістю $L_{0\lambda}$ та визначається дальністю d .

Отже, згідно формул (3.1.) та (3.2.), яскравість поверхні в визначеному спектральному діапазоні залежить від його коефіцієнта відбиття. Контраст яскравості при цьому в двох спектральних діапазонах визначається різницею відповідних їм коефіцієнтів відбиття.

Метод базується на статистичних даних о спектральному коефіцієнту відбиття ряду природних поверхонь (рис. 3.21.).

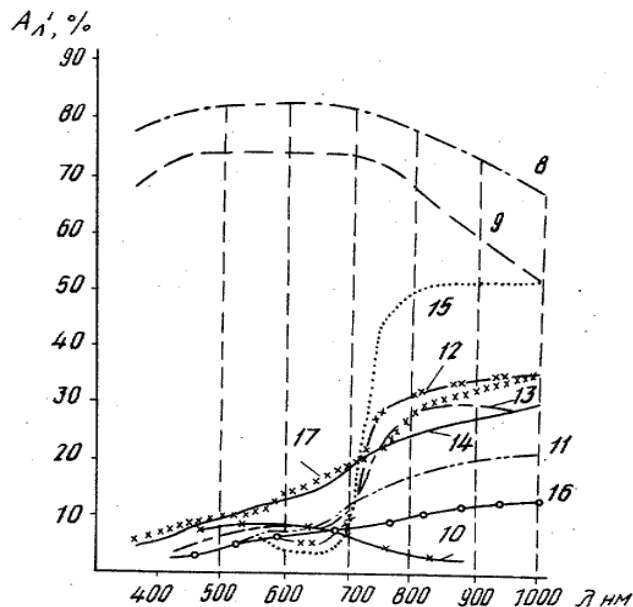


Рис. 3.21. Спектральна характеристика коефіцієнта відбиття різних поверхонь.

На рис. 3.21. позначено: крива снігу з льодовою кіркою 8; крива снігу крупнозернистий 9; 10 – крива водної поверхні озера; 11- крива вологого ґрунту; 12- крива силосної кукурудзи; 13 – крива високої зеленої кукурудзи; 14 – крива пожовтілої кукурудзи; 15 – крива високої трави; 16 – крива чорнозему; 17 – крива гірки зі злаків.

Аналіз даних в діапазоні ІЧ (905 нм) показав, що величина коефіцієнта відбиття і характер спектральної кривої діляться на 3 групи: коефіцієнт відбиття в районі 5-15% відповідає твердому дорожньому покриттю та більш прозорих поверхонь при цьому криві більш монотонні. 10-35% відповідає рослинності, де спостерігається стрибкий приріст кривих. Для снігу та інших світлих поверхонь маємо високий показник відбиття 80-55% з монотонно спадаючою кривою. Ці дані доповнюються значеннями КВ для різних поверхонь з таблиці 2.1.

3.13. Характеристики лавинного фотодіода

Основні енергетичні параметри фотодіода визначається шляхом підстановок. При цьому оптичні характеристики приймально-передавальної системи, зовнішнього середовища та відстані приймаються постійними. Тоді:

$$\Phi_{\text{вх}} = \frac{\tau_c \cdot A_{\text{вч}} \cdot A_{\text{вх}} \cdot L(\Delta\lambda)}{d^2} \quad (3.3.)$$

де $\Phi_{\text{вх}}$ – світловий потік на вході фотодіода;

τ_c - коефіцієнт пропускання середовища;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$A_{\text{вч}} \cdot A_{\text{вх}}$ – площі видимої частини відбиваючої поверхні і вхідної зіниці фотодіода відповідно;

Відомо, що амплітуда вхідної напруги фотодіода:

$$U_{\text{фд}} = S \Phi_{\text{вх}} = \frac{S \cdot E \cdot \tau_c \cdot A_{\text{вч}} \cdot A_{\text{вх}} \cdot \rho_{\Delta\lambda}}{d^2 \cdot \pi} \quad (3.4.)$$

Де S – інтегральна чутливість фотодіода.

Підставивши формули (3.1.) та (3.2.) в формулу (3.4.) отримаємо:

$$K_L(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2) = \frac{d^2}{S \cdot \tau_c \cdot A_{\text{вч}} \cdot A_{\text{вх}}} \cdot (U_{\text{фд1}}(\Delta\lambda_1) - U_{\text{фд2}}(\Delta\lambda_2))$$

$$K_L(\Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3) = \frac{d^2}{S \cdot \tau_c \cdot A_{\text{вч}} \cdot A_{\text{вх}}} \cdot (U_{\text{фд2}}(\Delta\lambda_2) - U_{\text{фд3}}(\Delta\lambda_3))$$

$$K_L(\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_3) = \frac{d^2}{S \cdot \tau_c \cdot A_{\text{вч}} \cdot A_{\text{вх}}} \cdot (U_{\text{фд1}}(\Delta\lambda_1) - U_{\text{фд3}}(\Delta\lambda_3))$$

Це співвідношення показує, що контраст яскравості досліджуваної поверхні в двох спектральних діапазонах визначається різницею амплітуд напруги та інших параметрів лавинних фотодіодів та коефіцієнту пропускання середовища.

Оскільки лазерне випромінювання майже не розсіюється в повітряному середовищі, то коефіцієнт пропускання можна прийняти за $\tau_c = 1$

Інтегральна чутливість для даних лавинних фотодіодів 20 мА / лм

Отже провівши декілька вимірювань для основних типів поверхонь, що найчастіше зустрічаються, були отримані еталонні результати КВ та контрасту яскравості при різних спектральних діапазонів. Результати будуть занесені до запам'ятовуючого пристрою як значення контрастів яскравості. Під час експлуатації системи моніторингу земної поверхні, отримані під час сканування масиви даних (значення контрастів яскравості або можливо порівнювати коефіцієнти відбиття) будуть порівнюватися з еталонними значеннями в комп'ютері. Якщо, дані співпадають з еталонними даними (з деякою допустимою похибкою), то ідентифікація типу поверхні було проведено успішно.

Оскільки на результати впливають багато факторів, то краще сформулювати за отриманими даними групи.

За цими даними будуть сформовані групи, та провести селектування.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це дозволить відокремити ці групи по ступеням загрози для НБТ, з подальшим проведенням заходів щодо його безпечної експлуатації як в пересіченій місцевості так і громадських місцях. Наприклад, при наявності твердої перешкоди забезпечити об'їзд з можливих боків. При наявності рослинності проаналізувати наскільки ця рослинність є потенційною загрозою для НБТ. Якщо перед НБТ постає рідка поверхня – повністю уникнути її.

3.14. Розробка схеми електричної принципової

При розробці принципової схеми використовуються усі раніше вибрані електронні компоненти та пристрої. В системі використовуються 96 друкованих плат, а саме:

- 48 плат системи формування оптичних сигналів. На кожній розміщуються лазерні діоди, драйвери, роз'єми для підключення;
- 48 плат підсистеми детектування. На кожній розміщуються лавинні фотодіоди, драйвери лавинних фотодіодів (підсилювачі), АЦП та роз'єми для підключення;
- 2 одноплатних комп'ютерів;

Основне живлення всіх плат поступає від джерела постійної напруги (акумуляторів), що є первинним живленням НБТ.

3.14.1. Принципова схема системи формування оптичних сигналів

Для керування лазерними діодами використовуються спеціальні схеми драйверів. Вони можуть працювати двома способами: 1) виробляти постійну регульовану напругу; 2) виробляти постійний струм, що протікає через лазер. Другий тип більш простий у проектуванні та використанні і існують різні схеми для їх реалізації. Однак запропонована схема драйвера постійного струму здатний подавати більший діапазон керуючих струмів. Запропонована схема може пропускати постійні струми від 0 мА до 0,5 А. Якщо потрібні більш високі струми, потрібні невеликі зміни схеми (головним чином: зміна значення одного резистора). Основна активна частина схеми - це подвійний операційний підсилювач (ОП). Один з інтегрованих підсилювачів використовується як буфер, другий - за конфігурацією перетворювача напруги.

На рис. 3.22. зображена принципова схема системи формування оптичних сигналів з використанням цього драйвера та лазерного діода. Принцип роботи полягає в наступному. Опорне напруга 5 В створюється діодом Дзеннера VD1 (це особливий тип випрямляючого діода, який може витримати пробій за рахунок напруги зворотного пробію без повного виходу

з ладу) і резистором R2. Ця напруга фільтрується за допомогою конденсатора C3 і подається на вхід підсилювача, підключеного як буфер.

Буфер завантажений налагоджувальним потенціометром R5, підключеним до землі. Таким чином, на його середньому терміналі напруга може змінюватися між 0 і до опорної напруги. Другий підсилювач разом з силовим транзистором NMOS працюють як перетворювач напруги на струм - вихідна напруга транзистора ідентична вхідній напрузі другого підсилювача.

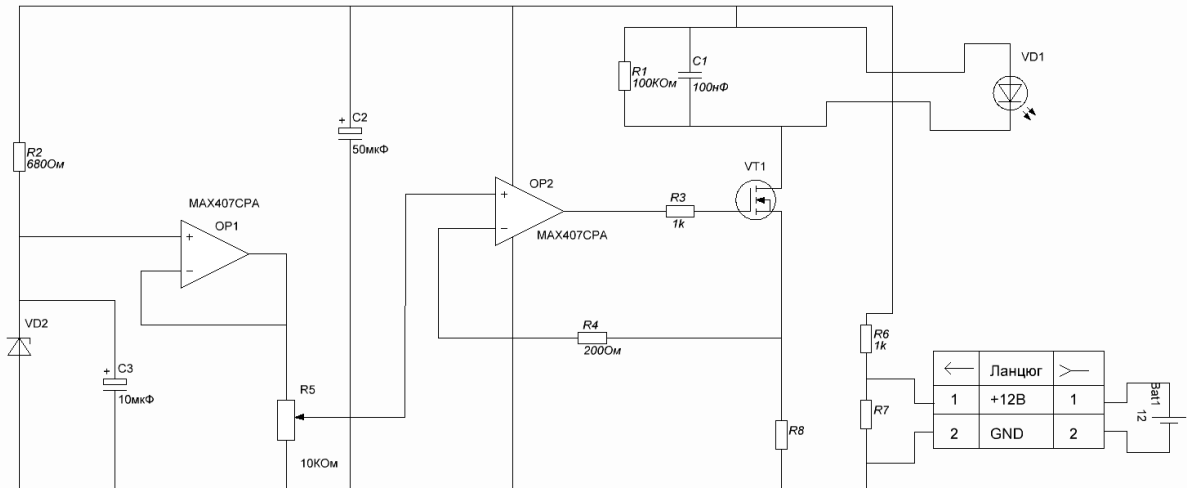


Рис. 3.22. Принципова схема системи формування оптичних сигналів

Потужність NMOS транзистора зазвичай має велику робочу зону, що в більшості випадків передбачає велику вхідну ємність. Для деяких пристроїв він може досягати декількох десятків нанофарадів. Ця ємність постає як ємнісне навантаження для операційного підсилювача. Підсилювач повинен бути в змозі керувати таким великим ємнісним навантаженням, не втрачаючи своєї стабільності.

У схемі використовується MAX407 (подвійний підсилювач CMOS з низьким зміщенням). Діапазон вхідного сигналу підсилювача повинен включати обидві напруги - землю та опорний;

Один SSS7N60B (транзистор Fairchild 600V 7A DMOS NMOS);

Принципова схема системи формування оптичних сигналів буде винесена як креслення МРП.171.081.006.001 ЕЗ.

3.14.2. Розрахунок параметрів системи формування оптичних сигналів

Вся система сканування живиться від 12В тому необхідно використати в схемі два додаткових резистори як дільники напруги.

Вихідна напруга для схеми розраховується за формулою:

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВІХ}} \left(1 + \frac{R7}{R6} \right) \quad (3.5.).$$

Оскільки обидві напруги відомі, виразимо через їх формулу .

$$R7 = R6 \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} - 1 \right).$$

Використаємо резистор R6 номіналом 1кОм з похибкою в 1%. Вихідна напруга U_{вих} має дорівнювати 5В, розрахуємо номінал резистора R7:

$$R7 = 1000 \left(\frac{12}{5} - 1 \right) = 1400 \text{ Ом} = 1,4\text{КОм}.$$

Вихідна напруга транзистора ідентична вхідній напрузі другого підсилювача. Напруга з'являється на резисторі R8, що визначає струм. Сформований струм:

$$I_{\text{ген}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_8},$$

Використаємо резистор R8 номіналом 10 Ом з похибкою в 1%.

$$I_{\text{ген}} = \frac{5}{10} = 500\text{мА}$$

Якщо потрібен більш високий струм, або опорну напругу слід збільшити, або значення R8 зменшити.

Потужність, вироблена R8, також повинна бути належним чином розподілена. Максимальна потужність, вироблена R8, становить:

$$P_{\text{мах}} = U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{ген}}$$

$$P_{\text{мах}} = 5 \cdot 0.5 = 2.5 \text{ Вт}$$

Тому належно використати резистор R8 потужністю 5Вт.

R1 і C1 використовуються для захисту лазерного діода від деяких сплесків напруги.

3.14.3 Принципова схема підсистеми детектування

Підсистема детектування являє собою лавинний фотодіод, підсилювач фотодіода та АЦП. На рисунку 3.23. зображена принципова схема підсистеми детектування.

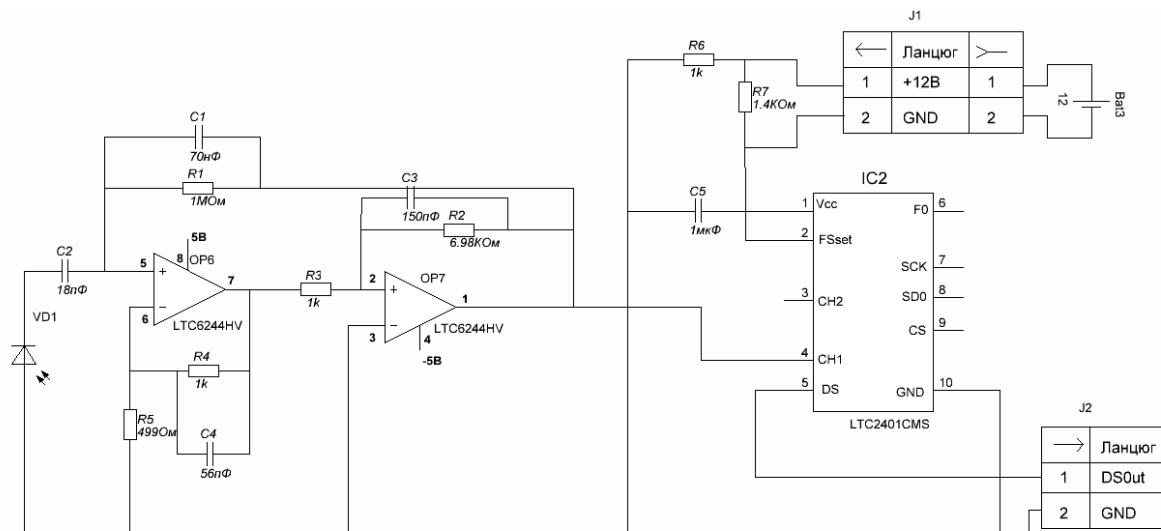


Рис. 3.23. Принципова схема підсистеми детектування.

Оскільки в схемі наявні реактивні елементи, то 2 каскади операційних підсилювачів (ОП) можна вважати їх як активні фільтри або як один смуговий фільтр. Необхідно розрахувати коефіцієнт підсилення всього підсилювача.

Отже, була розроблена принципова схема підсистеми детектування, що буде винесена як креслення МРП.171.081.006.002 ЕЗ.

3.14.4. Розрахунок параметрів підсистеми детектування

Схема складається з двох каскадів ОП, тому коефіцієнт підсилення всього підсилювача дорівнюватиме:

$$K = K_1 \cdot K_2, \quad (3.6.)$$

Де K_1 , K_2 – коефіцієнти підсилення (K_p) 1 та 2 каскаду відповідно.

Для знаходження КП використовується формула коефіцієнта передачі для фільтрів:

$$H(s) = \frac{KC}{s^2 + sB + C}, \quad (3.7.)$$

де ω_0 - частота зрізу; B, C – постійні коефіцієнти.

Передаточна функція 1 каскаду визначається:

$$H1(s) = \frac{\frac{1}{C1 \cdot R5 \cdot \frac{C2 \cdot R1}{R1 + C2}} \left(1 + \frac{R4}{R5}\right)}{s^2 + \left(\frac{1}{C2 \cdot \frac{C2 \cdot R1}{R1 + C2}} + \frac{R4}{R5}\right)s + \frac{1}{C1 \cdot R5 \cdot \frac{C2 \cdot R1}{R1 + C2}}}$$

Коефіцієнт підсилення:

$$K1 = 1 + \frac{R4}{R5} = 1 + \frac{1000}{499} = 3,004$$

Частота зрізу:

$$\omega_{10} = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{C1 \cdot R5 \cdot \frac{C2 \cdot R1}{R1 + C2}}} = \frac{1}{\sqrt{70 \cdot 10^{-9} \cdot 499 \cdot \frac{18 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^6 + 18 \cdot 10^{-12}}}} = 39,88 \cdot 10^6 \text{ Гц}$$

Передаточна функція 2 каскаду визначається:

$$H2(s) = \frac{\frac{1}{R2 \cdot C3} \left(1 + \frac{R2}{R3}\right)}{s^2 + \left(\frac{R2}{R3}\right)s + \frac{1}{R2 \cdot C3}}$$

$$K1 = 1 + \frac{R2}{R3} = 1 + \frac{6980}{1000} = 7,98$$

$$\omega_{10} = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R2 \cdot C3}} = \frac{1}{\sqrt{6980 \cdot 150 \cdot 10^{-12}}} = 977,29 \text{ Гц}$$

Звідси, коефіцієнт підсилення всього підсилювача дорівнюватиме:

$$K = K_1 \cdot K_2 = 3,004 \cdot 7,98 = 23.97 \approx 24$$

Отже, схема підсилює сигнали з лавинного фотодіода у 24 рази, після сигнали поступають до АЦП.

3.14.5. Розрахунок номіналів компонентів понижуючого перетворювача напруги.

Оскільки Rassbery Pi 4B живиться від 5В та 2.5 А постійного струму, потрібно використовувати понижуючий перетворювач напруги.

Оптимальним варіантом є понижуючий перетворювач напруги LM2596 використовується для перетворення постійної напруги з 12В до 5В для живлення більшості пристроїв в НБТ.

Характеристики:

- Вхідна напруга: 2,4 - 40 В
- Вихідна напруга: 1,2 - 37 В
- Вихідний струм: до 3 А (при струмі понад 1 А на мікросхему встановити радіатор)
- Частота перетворення: 150кГц
- ККД: до 92%
- Розміри: 43,2х21,1х14 мм
- Вага: 15 г

На рисунку 3.24. показаний схема перетворювача LM2596.

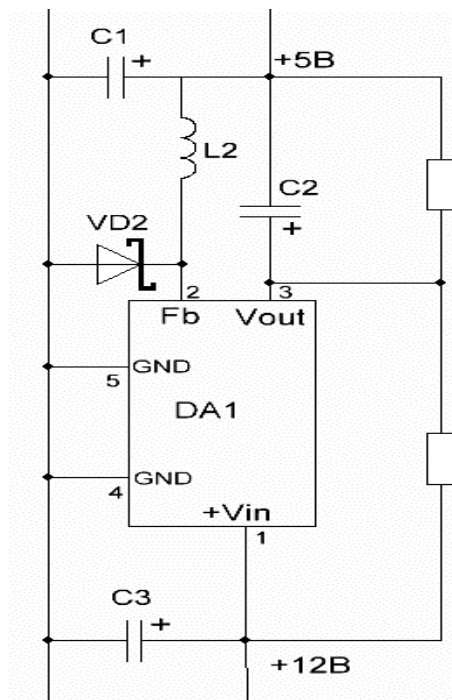


Рис. 3.24. Понижуючий перетворювач LM2596

Вихідна напруга для мікросхеми LM2596 розраховується за формулою:

$$U_{out} = U_{REF} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right). \quad (3.8.)$$

Виходячи із технічних характеристик даної мікросхеми: $U_{REF} = 1,23 \text{ В}$.

$$R2 = R1 \left(\frac{U_{out}}{U_{REF}} - 1 \right) \quad (3.9.)$$

Використаємо резистор R1 номіналом 1кОм з похибкою в 1%, для найкращої стабільності роботи перетворювача напруги. Вихідна напруга U_{out} має дорівнювати 5В, розрахуємо номінал резистора R2:

$$R2 = 1000 \left(\frac{5}{1,23} - 1 \right) = 3065 \text{ Ом} = 3,065 \text{ Ом.}$$

Округлюємо значення за таблицею E92 і маємо $R2 = 3000 \text{ Ом}$.

Виходячи із технічних параметрів мікросхеми [20], використаємо наступні елементи:

C1 – 470 мкФ, 50 В, Aluminum Electrolytic Nichicon PL Series;

C2 – 390 нФ, 35В;

C3 – 220 нФ, 35 В, Aluminum Electrolytic Nichicon PL Series;

D1 – 5 А, 40 В Shottky Rectifier, 1N5825;

L1 – 68 мкГн, L38

3.14.6. Методи з'єднання компонентів

В системі використовуються декілька електричних з'єднань між компонентами. Так плати системи формування оптичних сигналів та детектування, з'єднуються з комп'ютерами за допомогою штекерів JST-SH (Female, Male) на 8 пін, і використовуються у кількості 4 та 2 у основній та додатковій системі відповідно (Рис. 3.25.)

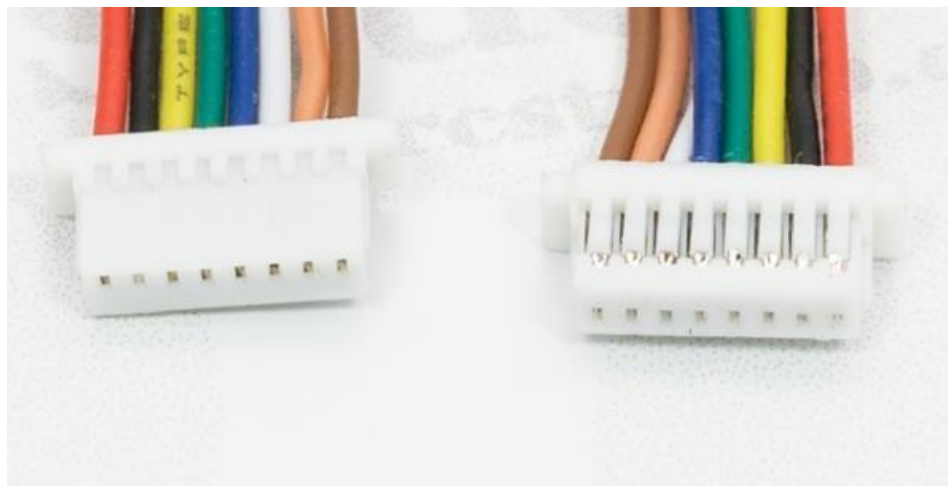


Рис. 3.25. Зовнішній вигляд штекерів JST-SH MALE

Також за допомогою двох пінового штекера є можливість від'єднати плати від живлення у разі заміни, ремонту та інших ситуацій.

Два одноплатних комп'ютера з'єднуються дротом типу звита пара. Це вид кабеля зв'язку. Представляє собою одну або декілька парних випромінювачів, скручених між собою (з невеликим числом витків на одиницю довжини), покритих пластиковою оболонкою. Звита пара - один із компонентів сучасних створених кабельних систем. Використовується в телекомунікаційних та в комп'ютерних мережах, переданих сигналами в багатьох технологіях, таких як Ethernet (за цією технологією з'єднуються між собою одноплатні комп'ютери), Arcnet, USB. У теперішньому часі, завдяки своїй дешевій і легкій монтажі, він є розширеним рішенням для побудови провідних (кабельних) локальних мереж.

3.15. Розробка друкованих плат

Розробка друкованих плат для підсистем детектування та випромінювання була здійснена у студентській версії програмного середовища Proteus. В якості друкованої плати використовується двостороння ГІС.

Гібридна інтегральна схема ГІС - інтегральна схема, в якій поряд з елементами, нероз'ємно пов'язаними на поверхні або в об'ємі підкладки, використовуються навісні мікромініатюрні елементи (транзистори, конденсатори, напівпровідникові діоди, котушки індуктивності, вакуумні електронні прилади, кварцові резонатори і ін.). Залежно від методу виготовлення нероз'ємно пов'язаних елементів розрізняють гібридні, плівкові

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і напівпровідникову інтегральні схеми. ГІС є діелектричною і механічною підставою для плівкових і навісних елементів і служать тепловідводом.

На рис. 3.26. зображені макети друкованої двосторонньої плати системи детектування.

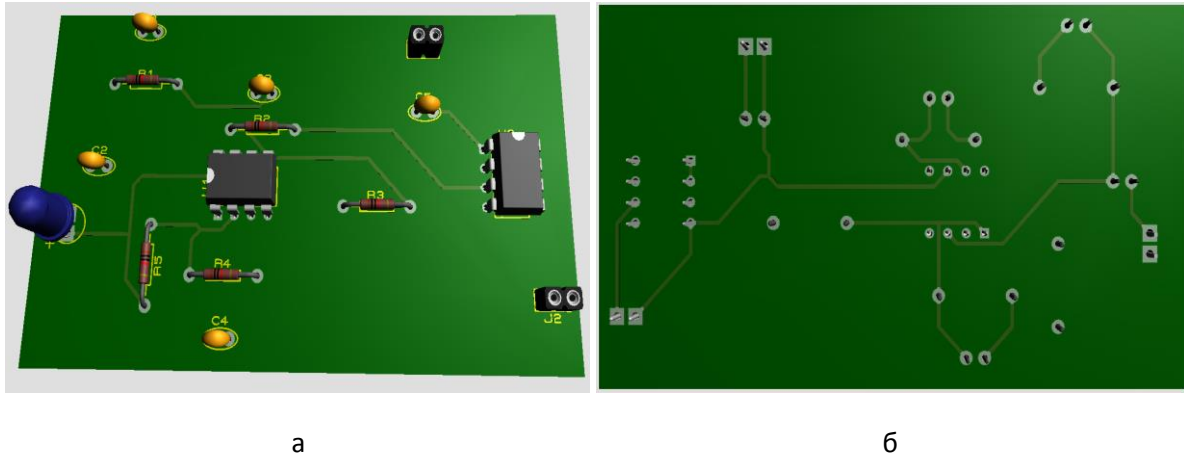


Рис. 3.26 (а, б) Макети друкованої плати системи детектування.

В проекті використовуються SMD резистори, в програмному середовищі була візуалізація лише дріт'яних резисторів.

На рис. 3.27. зображені макети друкованої двосторонньої плати системи випромінювання.

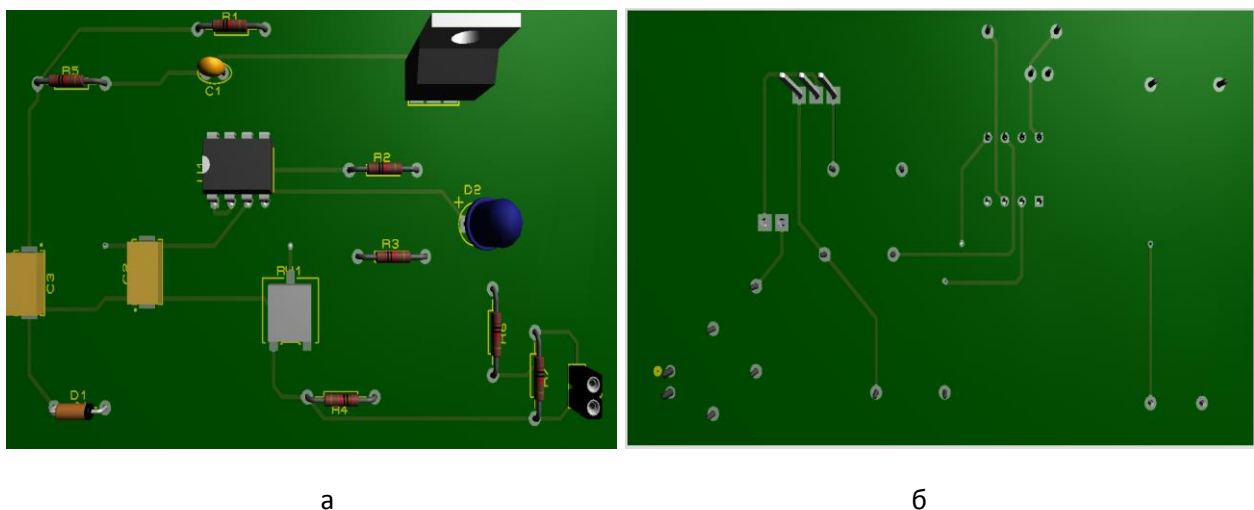


Рис. 3.27. (а, б) Макети друкованої плати системи детектування.

Висновки

Аналіз сучасних аналогів систем сканування на основі лідарів показав, що їх функціональні можливості не можуть повністю забезпечити відтворення геометрії всіх потенційно небезпечних об'єктів, що знаходяться навколо наземного безпілотного транспорту. Більше того далеко не всі об'єкти можливо ідентифікувати, наприклад відрізнити твердий камінь та кущ , які мають схожі геометрії, або тверду бетонну підлогу з піском та ін.

Тому розроблена електрична схема системи моніторингу навколишньої місцевості вирішує ряд задач, що виникають при експлуатації безпілотних апаратів саме в цій місцевості, а саме:

- 1) Створення основної системи сканування поверхні, що в свою чергу складається з системи формування оптичних сигналів та детектування. Система формування оптичних сигналів використовує з 16 лазерів інфрачервоного діапазону, 16 лазерів видимого діапазону. Тому доцільно було використати в основній системі сканування 2 типи лазерних діодів, що одночасно будуть сканувати навколишню

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

місцевість. Це збільшить вірогідність коректного відтворення об'єктів на місцевості в створеній 3D карті. Підсистема детектування використовує 16 фотодіодів для реєстрації ІЧ-випромінювання та 16 лавинних фотодіодів видимого випромінювання. Тобто на кожен лазер припадає один ЛФД.

- 2) Створення підсистеми розгортки, що базується на використанні хитного дзеркала під керуванням сервоприводів. Це не тільки нівелює недоліки системи у використанні меншої кількості лазерних випромінювачів ніж у відомих аналогів, а й збільшить вертикальну кутову роздільну здатність. Теоретично ця цифра буде дорівнювати 0°, на практиці значення кутової роздільної здатності буде сягати меншого значення ніж в аналогів, а отже – краща якість сканування, особливо дрібних та багато деталізованих об'єктів.
- 3) Наступна перевага розробленої системи витікає з другого пункту: за рахунок використання меншої кількості лазерів, а звідси й лавинних фотодіодів та драйверів, зменшується споживання енергії всієї системи.
- 4) За рахунок того, що лазери та лавинні фотодіоди мають досить значну вартість, зменшення їх кількості зменшить вартість системи.
- 5) Розробка додаткової системи сканування поверхні, що має схожу структуру, що і в основній системі за одними відмінностями – використання лазерів та лавинних фотодіодів, які працюють в ультрафіолетовому спектрі. Як було досліджено раніше, природа взаємодії УФ з матеріалами має значну відмінність від інфрачервоного та видимого випромінювання. Це відображення деяких об'єктів, що є прозорими для двох зазначених спектрів, значне зменшення коефіцієнту відбиття від деяких металів, збудження у деяких матеріалів явища люмінесценції та ін. Отже при використанні одночасно трьох спектральних діапазонів з'являється можливість за одразу трьома методиками сканувати ту ж саму місцевість та аналізувати цю місцевість одразу за трьома системами параметрів(коефіцієнти відбиття). Це дозволить значно вірогідніше визначити особливості поверхні з об'єктами, що скануються.
- 6) Було використано методику щодо визначення типу матеріалу, шляхом визначення контрасту яскравості об'єктів та їх розподіл по спектральних групах. Це дозволить відокремити ці групи по ступеням загрози для наземного безпілотної апарату, з подальшим проведенням заходів щодо його безпечної експлуатації як в пересіченій місцевості так і громадських місцях. Наприклад, заборонити рух НБТ або

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

направити його іншою траєкторією, зменшити або збільшити швидкість пересування, застосувати допоміжні пристрої, тощо.

- 7) Були розроблені електричні схеми принципові та друковані плати систем формування оптичних сигналів та детектування. Використання драйвера в системі формування оптичних сигналів покращить стабільність роботи лазерів. Використання підсилювача та АЦП в підсистемі детектування дозволить підсилити та перетворити аналогові сигнали в цифрові для їх адресації до одноплатних комп'ютерів

4.КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розробка корпусу системи

Корпус системи моніторингу повинен відповідати таким вимогам:

- Відносна компактність при зручному та безпечному розміщенні всіх пристроїв та компонентів;
- достатня міцність матеріалу. Стійкість до незначних перешкод таких як рослинність, падаючих плодів та ін. Також необхідно враховувати постійне обертання конструкції з досить значною швидкістю;
- відсутність впливу матеріалу на прилади та деталі системи;
- легкість;
- водонепроникність. Принаймні стійкість до дощу та мокрих об'єктів;

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- хімічна температурна стійкість. Це стосується не тільки зовнішніх температурних чинників, а внутрішніх адже під час роботи системи відбувається деяке виділення тепла;
- відносна дешевизна.

Всім цим критерієм відповідає ударостійкий полістирол. Він буде використовуватися як матеріал для зовнішньої оболонки пристрою та внутрішніх (полиці під плати, перегородки).

Ударостійкий полістирол - (модифікований полістирол) - продукт кополімеризації стиролу з бутадієновим і бутадієн-стирольним каучуком - матеріал, що значно перевершує по удароміцності стандартний полістирол. Являє собою жорсткий листовий матеріал, білий або кольоровий, з глянцевою, або матовою поверхнею. Висока технологічність процесів термо- і вакуум формування листів, відсутність внутрішніх напружень після формування, стійкість до розривів, хімічна стійкість до кислот і лугів, сумісність з харчовими продуктами, широкий діапазон робочих температур (від -40 до + 70 ° C) і підвищена ударостійкість - все це робить полістирол незамінним полімером у виготовленні корпусів приладів.

В табл. 4.1. представлені технічні властивості ударостійкого полістиролу.

Табл. 4.1 Технічні властивості ударостійкого полістиролу.

Густина, г/см ³	1,08
Температура розм'якшення, °C	90
Робочий діапазон температур, °C	-40...+70
Волого поглинання, %	0,05
Питома ударні в'язкість, кДж/м ²	30
Межа міцності при розтягненні р/кв.мм	17
Макс. Подовження при розтягненні, %	30
Модуль пружності при розтягненні, н/кв. мм	1850

Для створення певної форми використовується вакуумна термоформовка пластика.

4.1.1. Особливість розміщення компонентів.

Всі компоненти розміщуються в циліндричній головці, що має два умовних поверхні: на першому поверсі додаткова система сканування, на другому основна система сканування. Циліндрична головка обертається навколо центральної осі з регульованою частотою 5-20 ГЦ, які встановлена на нерухомій платформі.

Заради забезпечення максимальної компактності плати ПВ та ПД обох систем будуть розміщуватися вертикально під прямим кутом лазерами та фотодіодами догори.

Кожна плата є знімна та кріпиться на полиці так, щоб не пошкодити компоненти на платі, також це слугує додатковим тепловідводом. Плати розташовуються за схемою 4 на 8. Відстань між платами складе близько 0.8 см.

На рис. 4.1 зображена розроблена 3д модель внутрішньої частини пристрою

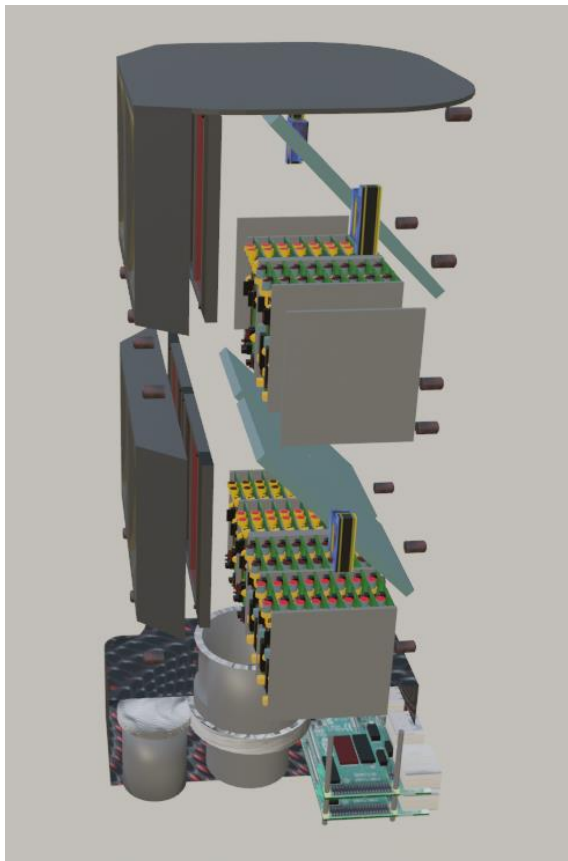


Рис. 4.1. 3D модель внутрішньої частини приладу.

Хитне дзеркало розміщується над всіма ПВ в основній та додатковій системі, що забезпечити потрапляння всіх пучків на поверхню дзеркала з урахуванням фактору хитання дзеркала на незначний кут. Хитне дзеркало складається з 2-х сегментів, що скріплені між собою рамою для забезпечення міцності дзеркал. Хитне дзеркало з обох боків керується невеликими Сервоприводами, що запрограмовані на обертання на певний кут, що буде розраховано далі. Кожен промінь буде відхилитися вверх-вниз на відстань 4мм. Тобто на максимальному відхиленні променя він «зустрінеється» з сусіднім променем.

Оптичні фільтри будуть встановлені на конструкцію з відповідним отвором (прямокутним) шляхом використання пазів та малих гвинтів. Геометрично вони будуть мати прямокутну форму, оскільки використання круглих є недоцільно за габаритами. Так само кріпляться всі циліндричні лінзи. Розміри лінз та фільтрів є однаковими і повинні бути обрані опираючись на відстань від першого до останнього лазерного пучка по вертикалі.

Одноплатні компютери Rassberi Pi розташовуються в нерухомій прямокутній платформі з отворами для виводу всіх основних інтерфейсів комп'ютерів.

В загалом на рис 4.2. зображена розроблена 3D модель системи моніторингу земної поверхні. Вона буде винесена як плакат.

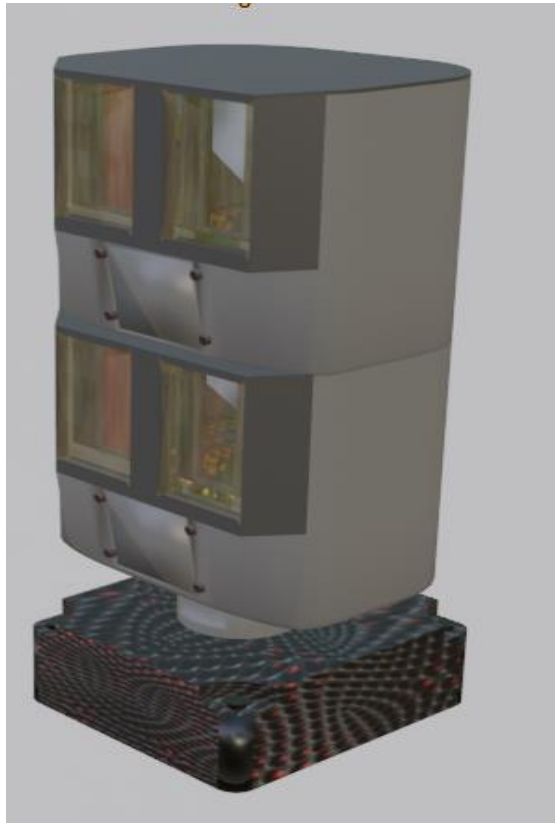


Рис. 4.2. Розроблена 3D модель системи моніторингу земної поверхні.

4.1.2. Поворотні механізми

Для забезпечення 360-градусного огляду по азимуту весь оптичний блок закріплений на обертовому підставі і обертається з частотою 600 обертів на хвилину. При необхідності ця частота регулюється в діапазоні 300 ... 1200 об / хв шляхом передачі простої текстової команди з комп'ютерів через послідовний інтерфейс на двигун. Двигун являє собою серводвигун постійного струму з високим крутним моментом 370-1200 об / хв з приводом UART / 12C / PPM (рис. 4.3.).



Рис. 4.3. Серводвигун

Він має наступні переваги:

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Змінна частота обороту штифта;
- Високий крутний момент;
- Невисока ціна відносно аналогів;
- Висока точність.

Однак при використанні його напряду виникає проблема: всі дроти з плат та інших пристроїв для безпеки та взагалі збереження працездатності всієї системи повинні проходити через нерухомі частини головки до комп'ютерів та живлення. Єдиним таким місцем є центр циліндричної голівки. Тому для забезпечення місця для прокладки дротів використовується зубчасте колесо з великим отвором в середині де будуть проходити дроти.

Рухомий вал з зубчастим колесом та нерухомий вал взаємодіють між собою шляхом використання підшипника. Зубчасте колесо взаємодіє з зубчастим колесом на штифті мотора.

Сервоприводи, що забезпечують рух дзеркал мають інші вимоги. В якості сервоприводів можуть використовуватися звичайні сервоприводи, як на рисунку 4.4.



Рис. 4.4. Сервопривід

Сервопривід - це мотор з управлінням через негативний зворотний зв'язок, що дозволяє точно керувати параметрами руху. Сервоприводом є будь-який тип механічного приводу, що має в складі датчик (положення, швидкості, зусилля і т.п.) і блок управління приводом, автоматично підтримує необхідні параметри на датчику і пристрої відповідно до заданого зовнішньому значенням.

Іншими словами:

Сервопривод отримує на вхід значення керуючого параметра. Наприклад, кут повороту.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок управління порівнює це значення зі значенням на своєму датчику.

На основі результату порівняння привід робить деяку дію: наприклад, поворот, прискорення або уповільнення так, щоб значення з внутрішнього датчика стало якомога ближче до потрібного значення.

Два сервоприводи мають такі основні вимоги:

- Крутильний момент: 5кг/см;
- Швидкість сервоприводу: 0,1 с/60°;
- Висока точність.

4.2. Розрахунок конструктивних параметрів

Для підсистеми розгортки необхідно розрахувати кут відхилення дзеркала в обидві боки в площині лінзи. Відомо, що відстань між сусідніми паралельними лазерними пучками складає 0.8 см. Отже відхилення пучка буде відбуватися вверх-вниз на 0.4 см на відстані від центра дзеркала до лінзи. Кут між пучками та площиною дзеркала складає 45°.

Згідно відстані між першим та останнім променем в 6.4 мм, що є проекцією дзеркала, довжина дзеркала повинна складати:

$$L_{\text{дз}} = (6.4 + 2 \cdot 0.4) \cdot \sqrt{2} = 10,18 \text{ см}$$

З урахуванням деякого запасу довжини дзеркала в обидва боки, довжина дзеркала складе 10,5 см.

Нехай відстань урахуванням товщини лінзи, оптичного фільтру від центра дзеркала до центру лінзи складе 8см. Графічно це зображено на рис. 4.5.

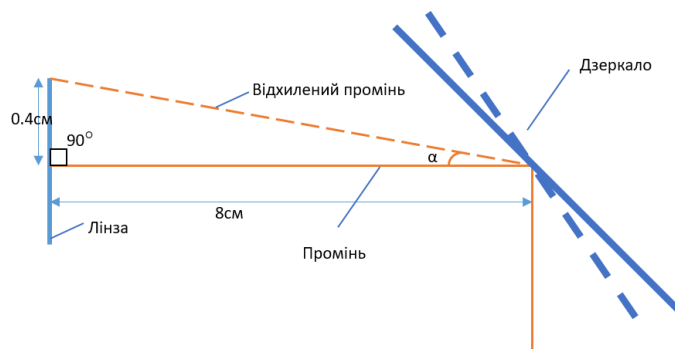


Рис. 4.5. Графічне зображення променів.

Отже, кут α дорівнюватиме:

$$\text{tg } \alpha = \frac{0.4}{8} = 0,05$$

Звідси

$$\alpha = \arctg (0.05) = 2,86^{\circ}$$

Отже кут нахилу дзеркала складатиме в 2 рази менше, тобто 1.43° в обидва боки.

Висновки

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У розробці системи моніторингу земної поверхні з'являються такі основні конструктивні та технологічні проблеми:

1) Розробка корпусу системи та підбір оптимального матеріалу. В ході аналізу було обрано такий матеріал для корпусу як ударостійкий полістирол. Він відповідає всім вимогам щодо корпусу приладу, а саме: відносна компактність при зручному та безпечному розміщенні всіх пристроїв та компонентів, достатня міцність матеріалу, відсутність впливу матеріалу на прилади та деталі системи, легкість, водонепроникність, непогана температурна та хімічна стійкість, оптимальне відношення ціна/якість.

2) Була розроблена спрощена 3д модель всього приладу з взаємним розташуванням всіх основних елементів. Рішення щодо розташування всіх елементів опиралися на компактність та їх безпеки.

3) Були проаналізовані та обрані поворотні механізми (сервоприводи) для руху як всієї головки так і дзеркал, знову ж таки з урахуванням компактності та безпеки елементів: захист дротів. Також враховувалися вимоги до сервоприводів щодо їх основних параметрів

4) Були проведені розрахунки для визначення куту повороту валів сервоприводів, що керують дзеркалами. Кут повороту склав 1.43° , це забезпечить мінімальну кутову роздільну здатність та мінімальний фактор урахування габаритів лінз, оптичних фільтрів, дзеркала на зміни цього кута.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розділ «Розроблення стартап-проекту» присвячено реалізації першого етапу розроблення стартап-проекту, а саме висвітленню маркетингових аспектів створення стартапу: відбору ідей, створенню концепції продукту, визначення перспектив ринкової реалізації проекту та розроблення маркетингової стратегії. Розділ є завершальною частиною магістерської дисертації.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Завдання розділу полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап- проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів.	1. Автомобільна промисловість	Можливість безпілотного керування автомобілем. Покращення автоматичного реагування безпілотника на потенційні перешкоди.
	2. Служби надзвичайних ситуацій	Участь у пошуково-рятувальних операціях
	2. Геодезія	Покращення аналізу навколишньої місцевості , що є небезпечні для людей

	3. Військова промисловість	Можливість виконання розвідки без залучення наряду людей з
	4. Правоохоронні органи	Використання такої системи у випадках обмеженості видимості місцевості (ніч, задимленість і т.д.) з кращими результатами.

Таблиця 5.2. Технооекономічні характеристики ідеї

№ n/n	Технооекономічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1 Velodyne HDL64-E	Конкурент2 RS-LiDAR-32	Конкурент3 Velodyne HDL32-E			
1.	Можливість відтворення об'єктів після сканування	+	+	+	+		+	

2.	Можливість ідентифікувати об'єкт за матеріалом	+	-	-	-			+
3.	Можливість передавати дані точок декількома шляхами	+	-	-	-			+
4	Можливість групувати об'єкти по ступеням загрози	+	-	-	-			+
5	Можливість відображення об'єктів, що для певного діапазону не є можливим	+	-	-	-			+
6	Низьке енергоспоживання	+	-	+	+			+
7	Оптимізована база даних від виробника	-	+	+	+			+
8	Можливість працювати в будь-які погодні умови	+	+	+	+		+	
9	Оптимальна вартість	+	-	-	-			+
10	Професіональна команда розробників з достатнім досвідом як в технологіях так і в маркетингу.	-	+	+	+			+

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРП.171.081.006. ПЗ

Арк.

96

Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка плати системи формування оптичних сигналів (гібридна мікросхема)	Метод фотолітографії, при цьому схему формують на підкладці (з текстоліту), отриманої шляхом різання алмазними дисками монокристалів на тонкі пластини.	Технології наявні	Ні
2	Розробка плати підсистеми детектування (гібридна мікросхема)	Метод фотолітографії, при цьому схему формують на підкладці (з текстоліту), отриманої шляхом різання алмазними дисками монокристалів на тонкі пластини.	Технології наявні	Ні
3	Розробка зовнішнього корпусу пристрою	Для створення певної форми використовується вакуумна термоформовка пластика	Технології наявні	Так
4	Розробка внутрішніх елементів корпусу пристрою	Для створення певної форми використовується вакуумна термоформовка пластика	Технології наявні	Так
4	Розробка підсистеми розгортки	Монтажні з'єднання елементів	Технології наявні	Так

Обрана технологія реалізації ідеї проекту:

Висновок: всі технології для виготовлення основних компонентів системи доступні на сьогоднішній день. Однак технологія виготовлення гібридних мікросхем не доступна авторів проекту, для цього необхідне спеціальне підприємство. Однак є можливість заключити договір з цим підприємством, тоді є можливість повного реалізації проекту.

Щодо

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців.	Розробників: 13 повноцінних компаній та кілька десятків стартапів. Декілька корпорацій, що фінансують ці стартапи та компанії
2	Загальний обсяг продаж	Близько 2.2 млрд/грн в рік
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Щорічний приріст обсягу ринку лідарів та систем на основі лідарів на 12,66%
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Вимоги до стандартизації та сертифікації
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Перевірка Національним інститутом стандартів та технологій (NIST) та Міжнародною асоціацією начальників поліції (IACP)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	У 2017 р. Світовий ринок LiDAR оцінювався у 1,69 млрд. Дол. США і, як передбачається, до 2023 р. сягне значення 3,45 млрд. дол. США, зафіксувавши складні річні темпи зростання в 12,66% протягом 2018-2023 рр.

Якщо, щорічний приріст ринку складає більше 12%, то є рентабельність вкладення грошей в розробку лідарів та систем на основі лідарів.

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап- проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба якісного сканування навколишньої місцевості з ідентифікацією об'єктів за матеріалами	Геодезичні служби, служби надзвичайних ситуацій, компанії, що базуються на автомобільній промисловості. Державний транспорт. Особливі групи громадян, що не здатні самі керувати транспортним засобом.	Щодо автомобільної промисловості: зростання тенденції застосування безпілотних апаратів. За рахунок того, що лідари є новими технологіями в першу чергу вони будуть звертати увагу на вартість та технологічні можливості.	-Вартість -Технологічні можливості: можливість просканувати всі об'єкти особливо високо деталізовані та дрібні. Ідентифікація цих об'єктів. Можливість автоматично групувати ці об'єкти за ступенями загроз.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Географічний	Слабкий або повний відсутній ринок лідарів в Східній Європі, що пов'язана зі слабким ринком автомобілей в цьому регіоні та слабка зацікавленість громадян у вітчизняних товарах важкої промисловості взагалом.	Орієнтація на державні замовлення. Розгортання ринку в Западній Європі, Північній Америці, Азії
2	Конкуренція	Значна концентрація конкурентів в таких країнах як: Китай, Сінгапур, Гонконг, США, Південна Корея та ін.	Створення більш привабливих пропозицій щодо ціни та технологічних можливостей. Орієнтація на державні замовлення.

3	Репутація	Не досконала репутація в сучасних лідарних системах серед громадян. Викликана ДТП та факту використання лазерів в системі, що мають певну небезпеку. Також високими цінами на аналоги.	Удосконалення системи сканування земної поверхні на основі лідару.
4	Недосконалість технології	Недосконалість технології сканування земної поверхні (недосконале відтворення та ідентифікація об'єктів)	Удосконалення системи сканування земної поверхні на основі лідару.

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Актуальність	Велика актуальність безпілотних транспортних засобів в багатьох сферах	Дослідження потенційних клієнтів безпілотних апаратів.
2	Висока ціна	За рахунок новизни технології, високі ціни на лідари та їх систем. Значна гнучкість цін	Створення системи з оптимальною вартістю.
3	Географічний	Майже повна відсутність ринку лідарів в Східній Європі.	Прийняття заходів щодо «зайняття ніші» на ринку СЕ.
4	Малий розмір сегментів ринку	Малий розмір сегментів ринку	Прийняття заходів щодо «зайняття ніші» на ринку

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
--------------------------------------	---	--

1. Тип конкуренції - Олігополія	Мала кількість компаній в світі щодо розробки лідарних систем, більшість з яких невеликі за впливом і капіталізацією.	Розгортання ринку лідарів в Східній Європі. Аналіз та встановлення меншої ціни на лідари, це за рахунок новизни ринку та роздутих цін конкурентів зробити досить легко. Виконання державних замовлень.
2. За рівнем конкурентної боротьби - глобальна	Вплив конкурентів, що базуються в певних та невеликих за кількістю країнах на весь інший світовий ринок	Розгортання ринку лідарів в Східній Європі. Виконання державних замовлень.
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Використання лідарів в багатьох сферах	Розгортання ринку на всі сфери, де лідари є актуальні.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова (горизонтальна)	-	-
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Основний фактор щодо розгортання ринку лідарів – висока ціна конкурентів	Створення системи лідарів з оптимальною вартістю.
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна		

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товаризамінники
	Velodine Robosense Optech Inc	Будь-яка автомобілебудівна компанія	Спеціалізовані інтернет магазини	Автомобілебудівна компанія, державні служби над. ситуацій, геодезичні служби.	Немає товарів-замінників

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРП.171.081.006. ПЗ

Арк.

101

Висновки:	Не висока інтенсивність конкурентної боротьби.	Є можливості входу в ринок Є потенційні конкуренти	Так, постачальники диктують умови. Рентабельність ринку та певного приладу	Так, клієнти диктують умови. Оптимальні ціни на товари. Висока технологічність щодо сканування поверхні	Менші ризики втрати попиту через відсутності товарів-замінників
-----------	--	--	---	---	---

Висновок: основні особливості ринку, що дозволяє більшою-мірою розгортати власне виробництво та бути конкурентоспроможними, це:

- Олігополічний тип конкуренції, при чому основні гравці на ринку не мають значного досвіду та не мають повністю контролюваного ринку лідарів та систем на їх основі;
- Слабкий ринок в Східній Європі є одночасно загрозою та можливістю. Загроза полягає в тому, що доведеться або радикально викликати зацікавленість у потенційних клієнтів з цього регіону при чому тратити багато фінансів і часу або доведеться розгортати ринок в інших регіонах де ринок є більш прибутковий; з іншого боку в цьому регіону є можливість зайняти вакантні ніші ринку і за рахунок менших цін в цьому регіоні вигідно ввести конкуренцію з іншим регіонами де більші фінансові затрати.
- Новизна технологій. За рахунок цього маємо гнучку вартість, не зайняті деякі сегменти ринку, важливість та актуальність безпілотних апаратів та будь-яких систем, що пов'язані з ними.
- Важливість технологій сканування серед як приватних так і державних організацій.

Отже є можливості та стратегії щодо введення конкуренції в цій галузі.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Фактор якості товарів	Технічні характеристики системи лідар, що зазначаються виробником в технічній документації більш близькі до реальних

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

		функціональних можливостей системи
2	Фактор масштабу (обсягу) виробництва товару.	За рахунок зростання масштабу власного виробництва можна ще більше знизити собівартість продукції і підвищити її якість.
3	Фактор новизни товару	Застосування нових методик щодо моніторингу земної поверхні
4	Фактор умов експлуатації товару.	Розробка безпечної конструкції системи
5	Фактор ціноутворення	Правильна стратегія щодо розрахунку ціни товару без значної націнки та роздування ціни.
6	Ринковий фактор	Мала кількість сегментів ринку особливо в Східній Європі.
7	Ринкова загроза	Загроза зниження доходів, загроза світової кризи.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10.) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «система моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з LIDARUK						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Фактор якості товарів	2						+	
2	Фактор масштабу (обсягу) виробництва товару.	2						+	
3	Фактор новизни товару	1					+		
4	Фактор умов експлуатації товару.	1					+		
5	Фактор ціноутворення	-2		+					
6	Ринковий фактор	0				+			

Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап- проекту

Сильні сторони: - Менша собівартість лідарів; - Кращі функціональні параметри (якість відображення об'єктів): за рахунок використання декількох	Слабкі сторони: - Низьке знання на ринку; - Низький стартовий капітал; - Слабка ринкова зацікавленість у регіоні дислокації підприємства;
---	--

спектральних діапазонів, підсистеми розгортки; -Новаторські застосування (визначення типу поверхні);	
Можливості: <ul style="list-style-type: none"> - За рахунок зростання масштабу власного виробництва можна ще більше знизити собівартість продукції і підвищити її якість; - Удосконалення існуючих методик без залучення значних витрат; - Розгортання ринку в регіонах з більшою зацікавленістю та актуальністю 	Загрози: <ul style="list-style-type: none"> - Значні витрати при розгортанні підприємства; - Нестабільна економічна та політична ситуація в даному регіоні; - Слабка ринкова зацікавленість у регіоні дислокації підприємства

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап- проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Створення стартап проекту з подальшою створення кооперації та холдингу з іншими стартапами або компаніями, що працюють в схожій галузі.	Ймовірність отримання ресурсів збільшується за рахунок більшої капіталізації, однак обсяг цих ресурсів буде меншою за рахунок розподілу ресурсів серед об'єднаних стартапів	2-3 Роки
2	Розгортання стартап проекту в інших регіонах	Ймовірність отримання ресурсів зменшується за рахунок конкуренції, однак обсяг цих ресурсів буде більшою за рахунок більшого обсягу ринку	1-2 Роки

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
-------	--	---	---	--------------------------------------	--------------------------

1	Не самі впливові автомобілебудівні компанії, в основному на Європейському ринку	Достатня готовність	Високий попит	Не дуже висока	Низька складність входу
2	Держані транспортні установи	Невисока готовність	Достатній попит	Майже немає	Простота входу у сегмент
3	Геодезичні організації	Висока	Високий попит	Досить висока	Середня складність
4	Служба надзвичайних ситуацій	Достатня готовність	Високий попит	Майже немає	Середня складність
Які цільові групи обрано:			1-4		

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Стратегія диференціації	-	<ul style="list-style-type: none"> - Впровадження нових технологій та методик сканування земної поверхні. - Можливість удосконалювати систему - Зосередження саме на можливості ідентифікації місцевості, що сканується. - Встановлення ціни з малою собівартістю 	Стратегія диференціації

2	Стратегія спеціалізації	-	Ввести торгівлю з клієнтами для яких важливо в першу чергу повна ідентифікація місцевості, що сканується не дивлячись на ціни та вузько направленість функціоналу	Стратегія спеціалізації
---	-------------------------	---	---	-------------------------

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні. Однак на ринку панує олігополія, є можливість зайняти деякі ніші або наслідувати лідерів ринку, користуючись їх недостатнім досвідом за рахунок відносно нового ринку.	Скоріше за все застосування першого та другого методу, оскільки сам ринок систем лідарів є досить новою, ще не встановилися певні стійкі гравці та їх постійні клієнти.	Лише системою горизонтальної розгортки, методикою побудови «хмари точок».	Стратегія наслідування лідеру

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартаппроєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Оптимальна ціна, тобто ціна з незначною собівартістю та націнкою за рахунок новизни технологій	Стратегія диференціації	<ul style="list-style-type: none"> - Впровадження нових технологій та методик сканування земної поверхні. - Можливість удосконалювати систему та передачі даних декількома способами - Зосередження саме на 	<ul style="list-style-type: none"> - Збільшення точності відображення об'єктів за рахунок використання втричі більше критеріїв та систем параметрів для відображення та ідентифікації місцевості, об'єктів. - Можливість

			можливості ідентифікації місцевості, що сканується. - Встановлення ціни з малою собівартістю	удосконалювати систему та передачі даних декількома способами
--	--	--	---	---

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Сканування навколишньої місцевості з відображенням геометрії об'єктів	Розробка системи сканування навколишньої місцевості	Збільшення точності відображення об'єктів за рахунок використання втричі більше критеріїв та систем параметрів для відображення та ідентифікації. Також використання підсистеми розгортки
2	Сканування навколишньої місцевості з ідентифікацією об'єктів	Використання в розробленій системі методики визначення типу об'єктів за матеріалом.	В конкурентах такої можливості не виявлено.
3	Обробка прийнятих сигналів та їх передачі до оператора	Використання двох сучасних одноплатних комп'ютерів з можливістю передачі даних декількома способами	В конкурентах передача відбувається лише одним методом.

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.		
	2.		
Якість: стандарти, нормативи, параметри багаторазових тестувань.			

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

	Пакування: Тверда транспортна тара
	Марка: ще не визначена
III. Товар із підкріпленням	До продажу: консультація, тест-драйв
	Після продажу: Гарантія, консультація, настройка
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: створення патенту пристрою, винаходу, корисної моделі виданим державним органом виконавчої влади з інтелектуальної власності.	

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товаризамінники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	-	Від 400 000 грн до 1 800 000 грн	Різна, від 40 000 грн і більше.	180 000 грн 220 000 грн

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Пошук пропозиції в автомобілебудівних та схожих за галуззю компаніях або спеціалізованих магазинах	Зарекомендувати себе як виключні фахівці саме з цієї галуззі та запевнити клієнтів, що автомобільні компанії отримують товари саме від них.	Однорівневий	Непрямі канали збуту, що являють собою постачальників, що також зацікавлені в даній галузі або в схожих за нею.
2	Вимоги щодо сертифікації товару та можливість провести тест драйв приладу.	Пред'явлення сертифікату від Національного інституту стандартів та технологій (NIST) та Міжнародної асоціації начальників поліції (IACP)	Однорівневий	Створена юридичною особи постачальником. Можливість представлення сертифікатів в реальному вигляді або на сайті.
3	Вимоги щодо гарантії	Пред'явлення гарантії від розробників посередниками або напяму	Однорівневий	Непрямі канали збуту, що являють собою постачальників,

				що також зацікавлені в даній галузі або в схожих за нею.
--	--	--	--	---

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Пошук пропозиції в автомобілебудівних та схожих за галуззю компаніях або спеціалізованих магазинах	Офіційні маркети автомобілебудівних компаній, віртуальні маркети в інтернеті.	Доступність Фінансова вигода Зручність Гарантійність	Зарекомендувати себе як виключні фахівці саме з цієї галуззі та запевнити клієнтів, що автомобільні компанії отримують товари саме від них.	Звернення до спеціалістів з реклами.
2	Вимоги щодо сертифікації товару та можливість провести тест драйв приладу, консультації.	Офіційні маркети автомобілебудівних компаній, віртуальні маркети в інтернеті, реальні мережі магазинів.	Доступність Фінансова вигода Зручність Гарантійність	Згадка про сертифікування та послуги консультації в рекламі	Звернення до спеціалістів з реклами.

3	Вимоги щодо гарантії	Офіційні маркети автомобілебудівних компаній, віртуальні маркети в інтернеті, реальні мережі магазинів.	Доступність Фінансова вигода Зручність Гарантійність	Згадка про гарантії та послуги консультації в рекламі	Звернення до спеціалістів з реклами.
---	----------------------	---	---	---	--------------------------------------

Висновки

Провівши маркетинговий аналіз та розробивши концепції стартап проекту можна зробити такі висновки щодо ринку лідарів та систем на основі лідарів:

- Попит на цей ринок досить значний про це говорить стабільний щорічний ріст капіталізації ринку на 12.2%.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						110
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Збільшення актуальності безпілотних апаратів та технологій з використанням лідарів. Про це говорить зростання компаній, стартапів, що націлені саме на цей ринок;
- Рентабельність ринку також є оптимальною і з роками лише буде зростати;

Бар'єри входження в основному географічні та фінансові. На створення навіть самої простої моделі необхідні деякі витрати, а отже - стартовий капітал. Конкуренція на ринку досить прийнятна, олігополічний тип конкуренції, при чому основні гравці на ринку не мають значного досвіду та не мають повністю контрольованого ринку лідарів та систем на їх основі, є незайняті сегменти ринку;

Для реалізації ринку використовуються стратегії диференціації та спеціалізації. Ключові стратегії полягають в:

- впровадження нових технологій та методик сканування земної поверхні;
- Можливості удосконалювати систему та передавати дані декількома способами;
- Зосередженні саме на можливості ідентифікації місцевості та об'єктів, що сканується та використання декількох критеріїв та систем параметрів для визначення особливості певного об'єкту серед інших ;
- Встановлення ціни з малою собівартістю, за рахунок проведених підрахунків було визначено, що є можливість встановити ціну більш ніж в 2 рази в порівнянні з аналогічними системами сканування.
- Розгортання та поширення ринку в певному регіоні де майже не має ринку і малі витрати на виробництво (відносно дешева сировина, робоча сила та ін.)

Використовуючи ці ключові особливості проекту можна ввести конкуренту боротьбу та поширювати свій ринок і надалі, адже є всі для цього передумови.

ВИСНОВКИ

Можна підвести загальні підсумки щодо аналізу та проектування системи моніторингу земної поверхні для наземних безпілотних апаратів, що є предметом та завданням магістерської дисертації.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		111

Був проведений літературний огляд. Першим завданням літературного огляду було дослідження сучасних лідарів та систем, що працюють на основі лідарів і є їх головною складовою.

Було досліджено такі основні аспекти лідару як:

- Процес випромінювання та прийом масиву сигналів з лазерних випромінювачів;
- Основні атрибути лідару за якими будується тривимірна карта та визначаються параметри об'єктів, що були проскановані та відтворені на цій карті;
- Основні компоненти лідару;
- Методики визначення відстані від лідару до об'єктів, що скануються;
- Використання підсистеми розгортки, орієнтації та позиціонування;
- Використання сховище даних;

Дослідивши ці аспекти лідарів та систем на основі лідарів, що використовуються саме для НБТ було виявлено такий ряд основних проблем при експлуатації:

- Сучасні аналоги не здатні повністю відтворити всі важливі об'єкти, особливо дрібні та деталізовані.
- Сучасні системи використовують лише одну систему і покладаються лише на одні системи параметрів, це може призвести до виникнення помилок.
- В сучасних аналогах відбувається лише візуальне визначення об'єктів, де іноді з'являється невизначеність щодо природи та структури певного об'єкту.
- Майже всі прилади для сканування поверхні за рахунок новизни самої технології та ринку мають роздуту та некоректну цінову політику.

Дослідницький розділ був присвячений дослідженню взаємодії лазерного випромінювання різної довжини хвилі з різними типами поверхні. Об'єктом дослідження стали залежності КВ та коефіцієнта поглинання різних поверхонь для ближнього ІЧ-випромінювання, видимого випромінювання та УФ-випромінювання. Було проаналізовано, що кожна поверхня по різному взаємодіє з лазерними випромінюванням в різних спектральних областях.

Наприклад:

- Прісна вода має найбільший КВ при видимому діапазоні, лише у води є така ознака серед інших представлених матеріалів;
- Рослинність (трава, листя) має досить пологий приріст КВ в діапазоні 0.35-0.7 мкм зі стрімким зростанням коефіцієнта в ІЧ-діапазоні, що також є особливістю перед іншими поверхнями;
- Коефіцієнт відбиття для цементу та кори дерева майже рівномірно зростає зі збільшенням довжини хвилі;

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						112
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- КВ для алюмінію майже не змінюється і має дуже високий показник;
- Більшість металів має відносно низький КВ в УФ-області, набагато високі показники в інфрачервоному та видимому діапазонах;

Отже кожний тип поверхні має свої відмінні особливості перед іншими поверхнями, що визначаються КВ, а отже – різними за параметрами сигналами, що надійдуть після фотоприймачів. За цими результатами було доцільно використати методику щодо ідентифікації типу поверхні, що базується на порівнянні таких параметрів як коефіцієнт відбиття, контрасту яскравості, що були отримані під час експлуатації з еталонними значенням цих параметрів.

Проаналізувавши основні проблеми було розроблено:

1) Основна система сканування поверхні, що в свою чергу складається з системи формування оптичних сигналів та детектування. Система формування оптичних сигналів використовує з 16 лазерів інфрачервоного діапазону, 16 лазерів видимого діапазону. Було проаналізовано, що кожна поверхня по різному взаємодіє з лазерними випромінюванням в різних спектральних областях. Тому доцільно було використати в основній системі сканування 2 типи лазерних діодів, що одночасно будуть сканувати навколишню місцевість. Підсистема детектування використовує 16 фотодіодів для реєстрації ІЧ-випромінювання та 16 лавинних фотодіодів видимого випромінювання. Це збільшить вірогідність коректного відтворення об'єктів на місцевості в створеній 3D карті.

2) Розроблена додаткова система сканування поверхні, що має схожу структуру, що і основні системи за одними відмінностями – використання лазерів та лавинних фотодіодів, які працюють в ультрафіолетовому спектрі. Як було досліджено раніше, природа взаємодії УФ з матеріалами має значну відмінність від інфрачервоного та видимого випромінювання. Це відображення деяких об'єктів, що є прозорими для двох зазначених спектрів, значне зменшення коефіцієнту відбиття від деяких металів, збудження у деяких матеріалів явища люмінесценції та ін. Отже при використанні двох блоків та одночасно трьох спектральних діапазонів з'являється можливість за одразу трьома методиками сканувати ту ж саму місцевість та аналізувати цю місцевість одразу за трьома системами параметрів(коефіцієнти відбиття). Це дозволить значно вірогідніше визначити особливість поверхні з об'єктами , що скануються, зменшить систематичні помилки, покращить та розширить функціональність системи при різних умовах.

3) Створена підсистема розгортки в обох блоках, що базується на використанні хитного дзеркала під керуванням сервоприводів. Це не тільки нівелює недоліки системи у використанні меншої кількості лазерних випромінювачів ніж у відомих аналогів, а й збільшить вертикальну кутову роздільну здатність. Теоретично ця цифра буде дорівнювати 0°, на практиці значення кутової роздільної здатності буде сягати меншого значення ніж в аналогів, а отже – краща якість сканування, особливо дрібних та багато деталізованих об'єктів.

4) Наступна перевага розробленої системи витікає з другого пункту: за рахунок використання меншої кількості лазерів, а звідси й лавинних фотодіодів та драйверів, зменшується споживання енергії всієї системи.

5) За рахунок того, що лазери та лавинні фотодіоди мають досить значну вартість, зменшення їх кількості зменшить вартість системи.

6) Було використано методику щодо визначення типу матеріалу, шляхом визначення контрасту яскравості об'єктів та їх розподіл по спектральних групах. Це дозволить відокремити ці групи по ступеням загрози для наземного безпілотного апарату, з подальшим проведенням заходів щодо його безпечної експлуатації як в пересіченій місцевості так і громадських місцях. Наприклад, заборонити рух НБТ або направити його іншою траєкторією, зменшити або збільшити швидкість пересування, застосувати допоміжні пристрої, тощо.

7) Використавши 2 сучасних одноплатних комп'ютера створено можливість передачі сигналів між ними та до оператора декількома шляхами. Більше того в разі несправності першого комп'ютера основну роль на себе візьме другий з втратою 24 каналів, однак це збереже роботу всієї системи.

8) Були розроблені електричні схеми принципів та друковані плати систем формування оптичних сигналів та детектування. Використання драйвера в системі формування оптичних сигналів покращить стабільність роботи лазерів. Використання підсилювача та АЦП в підсистемі детектування дозволить підсилити та перетворити аналогові сигнали в цифрові для їх адресації до одноплатних комп'ютерів.

Були проаналізовані основні конструктивні та технічні аспекти системи, за результатами яких була побудована 3D модель системи моніторингу земної поверхні з компактним та безпечним розміщенням елементів.

За рахунок маркетингового аналізу та розробки концепції стартап-проекту було виявлені основні загрози, можливості, сильні та слабкі сторони даного проекту. Розроблені стратегії дозволить розгорнути ринок даної системи з можливістю збереження конкурентоспроможності та подальшим розширенням цього ринку по всіх регіонах.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						114
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При створенні стартап-проекту було визначено орієнтовну вартість розробленої системи моніторингу. Вона склала в залежності від факторів від 180 до 220 тисяч гривень, що як мінімум вдвічі дешевше ніж в конкурентів. Обрана стратегія - переслідування лідера, має значно менше ризиків та є найоптимальнішою базовою стратегією для ринку лідарних систем. Ринок лідарів є досить рентабельним і з роками лише буде розширюватися.

За рахунок використання оптимальних для даної системи компонентів, розроблена система моніторингу земної поверхні забезпечує такі характеристики:

Кількість каналів (променів): в загальному 48 (3 блоки по 16);

Напруга живлення 5-12 В;

Максимальна відстань сканування: 160 м;

Точність сканування: ± 2 см;

Кутова роздільна здатність вертикальна: $\sim 0.04^\circ$;

Кутова роздільна здатність горизонтальна: $\sim 0.1^\circ$;

Швидкість обертання головки: 5-20 Гц;

Вертикальне поле зору: 40° ;

Кількість точок даних за секунду: ~ 800000 ;

Ці характеристики відповідають технічному завданню до магістерської дисертації.

Перелік використаної науково-технічної літератури

- 1) Основні типи лідарів [Електронний ресурс] – 2014 Режим доступу до журналу: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.html>. – Назва з екрану.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						115
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 2) Сканирующие лазерные дальномеры (LIDAR) [Электронный ресурс] – 2016 Режим доступа до журналу: blog.myelectronics.com.ua/сканирующие-лазерные-дальномеры-lidar. – Назва з екрану.
- 3) What is a LAS dataset. [Электронный ресурс] – 2016 Режим доступа до журналу: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-.html> – Назва з екрану.
- 4) Курпас Д.В., Бевза О.М, Електронна система керування безпілотним наземним транспортом. - Київ : КПП ім. І. Сікорського, 2018.
- 5) Георгиев Н. И., Нойберт Р., Татевян С. К., Хайретдинов К. А. Лазерные спутниковые дальномеры // Наука и человечество, 1989. — М.: Знание, 1989.
- 6) RS-LiDAR-32. [Электронный ресурс] – 2016 Режим доступа до журналу: <https://www.robosense.ai/rslidar/rs-lidar-32> – Назва з екрану.
- 7) Долгих Г. И., Привалов В. Е., Лазеры. Лазерные системы. – Москва, 2009.
- 8) Trimble MX2. Mobile Mapping System. [Электронный ресурс] (Trimble Inc)– 2018 – Режим доступа до журналу: <https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2019-03/Datasheet%20-%20MX2%20Mobile%20Spatial%20Imaging%20-%20English%20A4.pdf> – Назва з екрану.
- 9) Вудс С., Дака М., Флин Г. Волоконные лазеры средней мощности и их применение // Фотоника / под ред.Н. Л. Истомина — 2008. — вып. 4. — С. 6–10.
- 10) Agrawal G. P. Applications of nonlinear fiber optics. — 2nd ed. — Academic Press, 2008. — Vol. 10. — 508 p. — (Optics and Photonics Series). — ISBN 9780123743022.
- 11) Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions. J. WOJTANOWSKI, M. ZYGMUNT, M. KASZCZUK, Z. MIERCZYK, and M. MUZAL. — Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, 2 Sylwestra Kaliskiego Str., 00–908 Warszawa, Poland.
- 12) Вычислительная техника. Терминология: Справочное пособие. Выпуск 1 / Рецензент канд. техн. наук Ю. П. Селиванов. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 168 с. — 55 000 экз. — ISBN 5-7050-0155-X.
- 13) Лазерные системы. Часть 2. Элементарная база лазерных установок Ю. А. Балошин, Г. Б. Дейнека, Е. Ф. Ищенко . – Москва: Янус-К, 2010. – 106 с. ISBN –978-5-8037-0498-0.

- 14) Nick Heath. Raspberry Pi 4 Model B review. [Електронний ресурс] – 2019. Режим доступу до журналу: <https://www.techrepublic.com/article/raspberry-pi-4-model-b-review-this-board-really-can-replace-your-pc>. – Назва з екрану.
- 15) Playing with a Raspberry Pi 4 64-bit. [Електронний ресурс] – 2019. Режим доступу до журналу: <https://blog.cloudkernels.net/posts/rpi4-64bit-virt>. – Назва з екрану.
- 16) Weber, Marvin J. Handbook of laser wavelengths, CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-3508-6
- 17) Ньютон И. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света / Перевод Вавилова С. И. — изд-е 2-е. — М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1954. — С. 131. — 367 с. — (серия «Классики естествознания»).
- 18) Мейер А., Зейтц Э. Ультрафиолетовое излучение, пер. с нем., М., 1952. (рос.)
- 19) Черешанский В.А. Способ определения вида естественной подстилающей поверхности / В.А. Черешанский, И.А. Иванченко. – Одесса: Одесский государственный университет им. И.И. Мечникова, 1990.
- 20) LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator [Електронний ресурс] (Texas Instruments)– 2013 – Режим доступу до журналу: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/524001/TI/LM2596.html>. – Назва з екрану.
- 21) Dual 50MHz, Low Noise, Rail-to-Rail, CMOS Op Amp. [Електронний ресурс] – 2018. Режим доступу до журналу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6244fb.pdf> – Назва з екрану.
- 22) Проектирование и технология печатных плат / Е.В. Пирогова – ИНФРА-М, 2005 – ISBN:5-16-001999-5 – 560с.
- 23) Перспективы рынка беспилотных автомобилей на 5 лет [Електронний ресурс] // BesPilot.ru. – Режим доступу: <https://bespilot.com/sprojects/139-perspektivu-rynka-ba-na-5-let> – Назва з екрана.
- 24) Влияние цвета поверхностей помещения на расчет освещенности [Електронний ресурс] / А. Гайдай // e27.ua . – Режим доступу: <https://e27.com.ua/ua/blog/2017-05-03-vliyanie-cveta-poverkhnostey-pomeshheni.html> – Назва з екрана.
- 25) Лазерні технології та комп'ютерне моделювання. Л.Ф. Головка. – К.: Вістка, 2009.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						117
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26) Гаращук В.П. Основи фізики лазерів. Навчальний посібник для студентів нехімічних спеціальностей ВНЗ / В.П. Гаращук. – Видавництво «Пульсари», 2012.

27) HDL-64E [Електронний ресурс] – 2017 Режим доступу до журналу: <https://velodynelidar.com/hdl-64e.html>– Назва з екрану.

28) Системи діагностики земної поверхні для наземних безпілотних транспортних засобів / Курпас Д.В., Тищенко О.В., Бевза О.М. : Матеріали 13-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки» 4 квітня 2019 р./ кафедра Електронних приладів та пристроїв / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, ст. 132-140.

29) Франк Зихла. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ. СХЕМЫ И ГОТОВЫЕ РЕШЕНИЯ. ISBN 978-5-9775-0816-2.

					МРП.171.081.006. ПЗ	Арк.
						118
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		